

Treball de Fi de Grau
Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

**Estudi de possibles alternatives per a
retirar l'estructura de suport d'una peça
impresa mitjançant una impressora 3D de
tecnologia Polyjet d'Stratasys**

MEMÒRIA

| | |
|----------------------|-----------------------|
| Autor: | Sergi Porteros Villar |
| Directora: | Mercedes Musa |
| Ponent: | José Luis Cortina |
| Convocatòria: | Juliol 2014 |



**Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona**



Resum

Aquest projecte neix de la problemàtica existent al netejar l'estructura de suport necessària per la creació d'una peça o d'un prototip mitjançant una impressora 3D de tecnologia Polyjet de la marca Stratasys, i té com a objectiu la realització d'un estudi experimental sobre possibles mètodes alternatius per a la seva eliminació. La metodologia tradicional consisteix en l'aplicació manual d'aigua a pressió directament sobre la peça, causant problemes com la necessitat d'un operador durant tot el procés o la ruptura de peces delicades a causa de la gran força a la que les seves superfícies estan sotmeses. A més, realitzar una neteja completa i eliminar tot el suport present al finalitzar l'impressió és una tasca laboriosa que normalment sol requerir d'un conjunt de postprocessos lents i llargs, especialment en casos de petits forats o de l'assemblatge de varies peces impreses per separat.

La tecnologia Polyjet d'Stratasys és una tecnologia basada en la creació d'un objecte en tres dimensions a partir de la superposició progressiva de capes en dues dimensions d'un fotopolímer líquid, que solidifica capa a capa al curar-lo amb llum ultraviolada.

Aquest estudi s'inicia amb una introducció al món de la fabricació additiva i a les diverses tecnologies que permeten realitzar impressions en tres dimensions, detallant especialment la tecnologia PolyJet en que està basat.

Posteriorment és realitza una caracterització química de l'estructura de suport i de diversos materials de construcció de la gamma *Rigid Opaque*, materials d'utilització més comuna en aquest tipus d'impressió. Amb els resultats obtinguts es detallen els possibles tractaments a realitzar, intentant optimitzar el procés en aspectes d'eficàcia, duració i automatització.

El procés experimental està basat en la realització progressiva de diversos assajos amb unes peces de prova dissenyades especialment per aquest fi, de material VeroWhitePlus RGD835, en les quals es mesura inicialment l'eficàcia del tractament transcorregudes tres hores des del seu inici i un posterior anàlisi a les quaranta-vuit hores per comprovar la no afectació del tractament al material de construcció de la peça.

Al finalitzar el procés experimental s'arriba a un tractament definitiu basat en la utilització d'una mescla formada per hidròxid de sodi dissolt en aigua destil·lada i un alcohol anomenat polietilenglicol, així com la utilització d'ultrasons i uns filtratges progressius de la mescla per eliminar l'estructura de suport que es va desprenent de la peça. Amb aquest tractament es procedeix a realitzar un estudi sobre peces definitives i funcionals, així com un estudi de compatibilitat amb altres materials de la gamma *Rigid Opaque* per augmentar la seva futura utilitat.

Finalment es realitza un estudi sobre l'impacte mediambiental d'aquest tractament definitiu i un anàlisi econòmic del projecte.

Sumari

| | |
|--|-----------|
| RESUM | 1 |
| SUMARI | 3 |
| 1. GLOSSARI | 5 |
| 2. PREFACI | 7 |
| 2.1. Origen del projecte..... | 7 |
| 2.2. Motivació..... | 7 |
| 2.3. Requeriments previs..... | 8 |
| 3. INTRODUCCIÓ | 9 |
| 3.1. Objectius del projecte..... | 9 |
| 3.2. Abast del projecte | 9 |
| 4. INTRODUCCIÓ A LA IMPRESSIÓ 3D | 11 |
| 4.1. Sinteritzat làser selectiu (SLS)..... | 14 |
| 4.2. Deposició de fil fos (FDM)..... | 15 |
| 4.3. Estereolitografia (SLA)..... | 16 |
| 4.4. Fabricació d'objectes per laminat (LOM) | 17 |
| 5. PRESENTACIÓ DE LA TECNOLOGIA POLYJET | 19 |
| 5.1. Stratasys | 19 |
| 5.2. L'estereolitografia PolyJet | 19 |
| 6. CARACTERITZACIÓ I ANÀLISI DELS MATERIALS | 23 |
| 7. DEFINICIÓ DELS POSSIBLES TRACTAMENTS | 29 |
| 7.1. Tractaments tèrmics | 29 |
| 7.2. Tractaments físics..... | 30 |
| 7.3. Tractaments químics..... | 30 |
| 8. EXPERIMENTACIÓ | 31 |
| 8.1. Metodologia experimental..... | 31 |
| 8.2. Procés experimental | 34 |
| 8.2.1. Assajos en medi aquós | 34 |
| 8.2.2. Assajos amb barreges hidroalcohòliques..... | 48 |
| 8.2.3. Optimització del tractament..... | 52 |
| 8.2.4. Assajos amb peces definitives | 70 |

| | |
|--|-----------|
| 8.2.5. Compatibilitat amb altres materials de la gamma <i>Rigid Opaque</i> | 77 |
| 9. PLANIFICACIÓ TEMPORAL I COST | 79 |
| 9.1. Planificació temporal..... | 79 |
| 9.2. Cost | 80 |
| 10. IMPACTE MEDI AMBIENTAL | 83 |
| CONCLUSIONS | 85 |
| Possibles actuacions futures..... | 85 |
| AGRAÏMENTS | 87 |
| BIBLIOGRAFIA | 89 |
| Referències bibliogràfiques | 89 |
| Bibliografia complementària | 90 |

1. Glossari

Additive Manufacturing (AM): Fabricació additiva. Procés pel qual es crea un objecte tridimensional a partir de la superposició successiva de capes, partint des d'un fitxer CAD en tres dimensions. No hi ha acord sobre si es pot utilitzar com a sinònim d'impressió 3D o no. – Amazing AM, LLC. –

Rapid Prototyping (RP): Prototipatge ràpid. Procés pel qual es crea de manera ràpida i precisa una peça en tres dimensions i normalment a escala d'un disseny realitzat per ordinador amb un software CAD. – eFunda, Inc. –

Rapid Manufacturing (RM): Fabricació ràpida. Procés de fabricació additiva per fabricar objectes sòlids a partir de l'aplicació seqüencial d'energia i/o material en determinats punts de l'espai per produir una peça. – LIA, Laser Institut of America –

Programes o software CAD: Acrònim de *Computer-Aided Design*, disseny assistit per ordinador. Programari informàtic que permet a l'usuari crear i dissenyar plànols o peces en dues o tres dimensions. En el món de la fabricació additiva els més utilitzats són de creació de peces en tres dimensions, a vegades referits com a programes CAD3D.

Standard Tessellation Language (STL): Format informàtic universal per a la impressió en tres dimensions

Selective Laser Sintering (SLS): Sinteritzat làser selectiu. És una de les principals tecnologies actuals d'impressió en tres dimensions.

Direct Metal Laser Sintering (DMLS): Sinteritzat làser de metall directe. Tecnologia d'impressió en tres dimensions englobada dins del grup del sinteritzat làser.

Selective Heat Sintering (SHS): Sinteritzat selectiu per calor. Tecnologia d'impressió en tres dimensions englobada dins del grup del sinteritzat làser.

Selective Laser Melting (SLM): Sinteritzat laser per fusió. Tecnologia d'impressió en tres dimensions englobada dins del grup del sinteritzat làser.

Electron Beam Melting (EBM): Fusió per raig d'electrons. Tecnologia d'impressió en tres dimensions englobada dins del grup del sinteritzat làser.

Fused Deposition Modeling (FDM): Deposició de fil fos. És una de les principals tecnologies actuals d'impressió en tres dimensions.

Stereolithography (SLA): Estereolitografia. És una de les principals tecnologies actuals d'impressió en tres dimensions.

Laminated Object Manufacturing (LOM): Fabricació d'objectes per laminat. És una de les principals tecnologies actuals en tres dimensions.

3D Printing (3DP): Impressió 3D.

Computer Numerical Control (CNC): Control numèric per computador. Sistemes d'automatització que permeten controlar el procés d'una màquina-eina a través de comandes programades.

Additive Layer Manufacturing (ALM): Fabricació additiva per capes. Procés pel qual es construeix un objecte en tres dimensions a partir de la superposició successiva de capes en dues dimensions.

Smooth Curvature Printing (SCP): Impressió de curvatura fina. Tecnologia d'impressió 3D que permet la creació de models per a processos a la cera perduda i per a realitzar motllos.

Llum ultraviolada (UV): Radiació electromagnètica amb longitud d'ona compresa entre 15 i 400 nanòmetres.

Heat Deflection Temperature (HDT): Temperatura de deformabilitat. Temperatura a partir de la qual una substància o un material comença a deformar-se

Material Safety Data Sheet (MSDS): Fulla de seguretat del material. Document on es recullen les especificacions d'un producte determinat així com les seves precaucions i actuacions en cas d'accident.

2. Prefaci

2.1. Origen del projecte

Aquest projecte neix de la necessitat real i actual amb que es troben els usuaris d'impressores 3D que usen màquines amb tecnologia PolyJet d'Stratasys a l'hora de netejar les peces recent impreses. Actualment, per a retirar el material suport i poder obtenir així la peça final desitjada s'ha de fer servir una màquina carenada d'aigua a pressió, i s'ha de fer de forma manual. Aquest procés presenta un conjunt d'inconvenients, ja que és necessària la presència d'un usuari operador durant tot el procés dedicat en exclusiva a netejar les peces. És un procés molt delicat i lent que pot arribar inclús a trencar les peces degut a la gran pressió amb que l'aigua colpeja la peça, especialment sobre geometries delicades i fines. Un altre problema que aquest fet ocasiona és la dificultat de netejar de manera completa les peces, especialment en forats, rosques i llocs de difícil accés. Per culpa d'aquest excés de material suport mal netejat es creen imprecisions dimensionals i mals encaixos en peces finalitzades que han estat impreses correctament.

2.2. Motivació

La principal motivació d'aquest projecte és la necessitat de solucionar un problema actual amb que els usuaris d'aquestes tecnologies es troben en el seu dia a dia. A més a més, i degut a la meua condició d'estudiant en pràctiques dins d'una empresa dedicada en part al món de la impressió 3D, he hagut de tractar personalment amb clients als quals se'ls hi ha plantejat aquest problema¹. Aquest cas en particular, basat en la odontologia digital, va ser el que finalment va motivar la realització d'aquest projecte.

A més, des de la pròpia empresa Stratasys s'està treballant activament en trobar una solució factible i que es pugui aplicar a les empreses, doncs és una problemàtica amb la que han de conviure diàriament a nivell mundial amb tots els seus clients, així com al seu centre de fabricació additiva RedEye on Demand situat a Minnesota, als Estats Units².

¹ Correspondència electrònica; Responsable Dpt. Producció Fresdental

² Correspondència electrònica; John Jones, EMEA Material Business Group Manager, Stratasys

2.3. Requeriments previs

Per a la realització d'aquest projecte ha estat prèviament necessari l'accés a aquestes impressores 3D de tecnologia PolyJet; així com un acord de col·laboració per part de l'empresa Comher, S.L. en el qual s'accepta que aquest estudi tindrà un cost associat, principalment degut al material necessari per a la realització de prototips i proves.

També ha estat necessari el consentiment per part de l'empresa creadora i que posseeix totes les patents relacionades amb aquesta tecnologia, la casa Stratasys.

3. Introducció

3.1. Objectius del projecte

El principal objectiu d'aquest projecte és realitzar un estudi experimental sobre possibles alternatives per a netejar una peça obtinguda mitjançant una impressora 3D de tecnologia PolyJet d'Stratasys i retirar l'estructura de suport de forma més òptima, sense afectar a les propietats ni a les dimensions de la mateixa. Es realitzaran estudis sobre tractaments químics, tèrmics i mecànics, així com combinacions dels mateixos, amb la finalitat d'aconseguir automatitzar el procés, reduir-ne el seu temps i millorar la seva eficàcia.

El tractament ha de ser capaç d'eliminar completament l'estructura de suport creada, en un temps no superior a dotze hores i sense la necessitat d'un operador dedicat íntegrament a la neteja de les peces de forma manual. Qualsevol temps superior a dotze hores no es pot considerar com una solució al problema plantejat, ja que la seva implementació no és viable en els processos que requereixen d'una impressió en tres dimensions.

3.2. Abast del projecte

L'abast d'aquest projecte queda restringit a l'estudi sobre diversos tipus de tractaments i la realització de tots els experiments i comprovacions pertinents. Per tant queda fora del projecte tot l'estudi posterior pel que fa a l'explotació i comercialització d'aquest coneixement en cas d'arribar a algun resultat favorable.

A més, es restringirà l'estudi a la gamma de materials *Rigid Opaque* dintre de tots els materials que la tecnologia PolyJet ofereix, ja que són els materials d'utilització més comuna en aquest tipus de tecnologia.

4. Introducció a la impressió 3D

La impressió 3D és un procés que té com a objectiu la creació d'un objecte tridimensional en l'espai. És a dir, permet crear un objecte volumètric amb una certa amplada (eix X), una certa profunditat (eix Y), i una certa altura (eix Z). Actualment per dur-ho a terme hi ha moltes i diverses tecnologies, les més importants de les quals es detallaran a continuació, però totes comparteixen el mateix principi bàsic: aconseguir un objecte en tres dimensions a partir de la superposició progressiva de capes, partint des de zero i creant l'objecte desitjat a mesura que es van construint i unint les diferents capes³.

Per a realitzar aquesta construcció de l'objecte sempre és necessari partir d'un model generat prèviament per ordinador mitjançant qualsevol programa CAD de disseny 3D, i processar-lo posteriorment com a arxiu *.stl per tal de que les impressores el puguin reconèixer i imprimir. Inicialment aquest format va ser creat per l'empresa 3DSystems per a les seves màquines d'estereolitografia (tecnologia d'impressió 3D que es detallarà més endavant), i l'acrònim es referia a STereoLithography; però gràcies a les seves característiques ha estat adoptat per totes les altres tecnologies i s'ha consolidat com a principal format d'impressió 3D, coneixent-se també com a *Standard Tessellation Language*. Està basat en la transformació d'objectes tridimensionals a simples triangles, descrivint únicament la geometria de la superfície dels cossos i obviat altres característiques com els colors, les textures o les unitats dimensionals del model⁴. Aquest tipus de format és equivalent a la realització d'una fotografia del model i una posterior parametrització en triangles, fet que permet reduir enormement la informació a processar per la impressora. A la Figura 1 s'il·lustra la diferència entre un format CAD qualsevol (peça de color gris), en aquest cas el *.sldprt emprat pel programa SolidWorks, amb el format STL (línies triangulades), *.stl emprat per les màquines de les diverses tecnologies que permeten realitzar una impressió en tres dimensions.

³ ASTM F2792 - 12a: "Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies"

⁴ "The STL Format", fabbers.com. Font tècnica: 3D Systems, Inc. "STereoLithography Interface Specification", octubre de 1989.

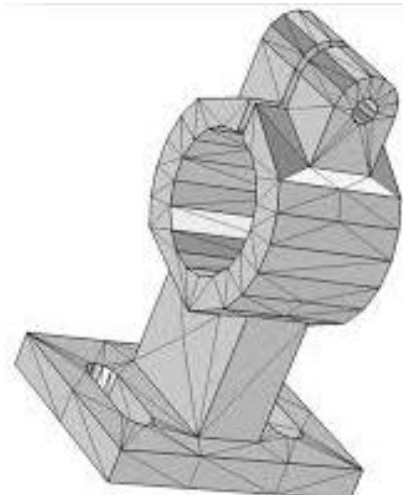


Figura 1. Comparativa del format CAD (peça grisa) amb el STL (superfície triangulada).
Font: comsol.com.

Un cop l'arxiu *.stl és enviat a la impressora, el software d'aquesta realitza una divisió per capes en funció de la tecnologia usada i de les prestacions de la màquina, que pot anar des dels 12 o 16 micròmetres⁵ fins a dècimes o inclús uns pocs mil·límetres. Un cop aquest software ha realitzat les divisions necessàries la impressora comença a imprimir la primera capa de l'objecte, i a sobre d'aquesta s'hi van afegint les successives capes fins a formar l'objecte final.

La impressió 3D també es referida habitualment (tot i que no hi ha acord ni pronunciament oficial sobre si són termes completament intercanviables en tots els seus usos⁶) com a fabricació additiva, o més comunament amb el terme anglès *Additive Manufacturing* (AM), degut al seu caràcter de creació i addició de matèria partint des de zero. Altres terminologies emprades actualment són *Additive Layer Manufacturing* (ALM), *Rapid Manufacturing* (RP), *Rapid Prototyping* (RP) o *3D Printing* (3DP), tot i existir petits matisos o concrecions en el seu significat i no estar oficialment acceptades⁷. Aquestes noves tècniques de fabricació són diametralment oposades a la fabricació tradicional basada en mètodes sostractius, normalment per arrancada de ferritja, en que es parteix d'un bloc compacte de material i es va buidant i treballant fins a obtenir la peça final desitjada, usualment mitjançant mètodes

⁵ Gamma Fortus de Producció Directa de la casa Stratasys. "*Fortus Spec Sheet*", Stratasys

⁶ "*3D Printing: Speaking the Language*", publicació de Todd Grimm a engineering.com; febrer 2012

⁷ "*3D Printing, Rapid Prototyping, Additive Manufacturing? What is the Difference?*", publicació de Eric Miller a padtinc.com; novembre 2012

com el fressat o el tornejat. Aquestes noves tecnologies additives presenten un seguit d'avantatges, ja que permeten un aprofitament complet del material usat, anul·len la necessitat d'utilitatge, permeten crear qualsevol tipus de geometria i no generen residus de forma inherent, problemes tots presents quan el mètode de fabricació està basat en la sostracció de material partint des d'un bloc base. A més a més, es redueix molt el temps de fabricació de la peça o prototip i permet introduir qualsevol tipus de canvi de forma molt més senzilla que en la fabricació tradicional, doncs només cal modificar l'arxiu informàtic i tornar a imprimir-lo en lloc d'haver de modificar tot el codi del programa de control numèric per computador(CNC) i reajustar tots els paràmetres.

La impressió 3D, o fabricació additiva, pot tenir per objectiu final un gran ventall de possibilitats en funció de la tecnologia emprada i de les prestacions de la màquina. Pot ser utilitzada per a la realització de prototips que no requereixin d'aspectes funcionals, el que es coneix habitualment amb el nom de *Rapid Prototyping*; pot donar resposta a la fabricació d'objectes finals amb plena funcionalitat, habitualment nombrat com a *Rapid Manufacturing*; o pot ser una barreja d'ambdós conceptes, tractant-se de prototips però que requereixen d'un cert grau de funcionalitat per a poder realitzar diversos tipus d'assajos i verificar aspectes de disseny.

Actualment s'està avançant molt també en un nou concepte de fabricació directament relacionat amb les noves tecnologies de fabricació, conegut com a *Mass Customization*. Aquest nou procés consisteix en explotar la personalització de qualsevol tipus d'objecte fabricat mitjançant una impressora 3D gràcies a la seva versatilitat i llibertat de disseny, creant a partir de patrons productes únics per a cada usuari.

Finalment un altre de les vessants més rellevants de la impressió 3D és el fet de poder construir un utilitatge i uns suports per poder facilitar altres tipus de processos i operacions sense haver de passar per un mecanitzat i tot el procés, temps i cost que això comporta.

Actualment existeixen quatre grans grups de tecnologies d'impressió 3D, que inclouen:

- Sinteritzat làser selectiu;
- Deposició de fil fos;
- Estereolitografia;
- Fabricació d'objectes per laminat.

4.1. Sinteritzat làser selectiu (SLS)

Aquesta tecnologia d'impressió 3D està basada en la sinterització de la matèria prima, ja siguin metalls o plàstics, mitjançant la utilització d'un làser. Inicialment és calenta la cubeta de construcció a una temperatura lleugerament inferior a la de fusió del pols del material, i es cobreix tota la safata d'impressió d'una fina capa d'aquest pols. Un làser, habitualment de diòxid de carboni, ressegueix aleshores un perfil proporcionat pel software de la màquina, i "dibuixa" una única capa de l'objecte sobre la safata. L'increment d'energia proporcionada per l'acció del làser facilita la fusió momentània de les partícules de pols, que tornen a solidificar instantàneament al desaparèixer l'energia del làser i, a nivell molecular, queden sinteritzades entre sí creant la primera capa de l'objecte definitiu. Un cop realitzada aquesta capa inicial, la safata de construcció baixa un petit increment (corresponent a l'altura de capa amb que s'està treballant) i es diposita una altra capa de pols per a permetre la creació de la següent capa de l'objecte. Per aconseguir una superfície plana i uniforme, abans de la sinterització de cada capa passa un corró per retirar el material sobrant i el diposita en uns dipòsits d'on podrà ser reaprofitat posteriorment. Aquest procés es va repetint capa rere capa fins a arribar a la construcció complerta de la peça partint del fitxer de CAD, peça que tant sols s'ha de retirar de la cubeta d'impressió que ha quedat completament plena de pols sense sinteritzar⁸.

Aquesta tècnica és molt versàtil ja que no requereix de la creació de ningun tipus de suport, doncs el propi pols que no ha solidificat actua com a base de la següent capa iniciant-se sempre la construcció sobre una superfície completament plana i homogènia. A més a més, i gràcies a aquesta mateixa característica, permet la creació de formes increïblement complexes amb qualsevol tipus de geometria en la peça final.

El Sinteritzat làser selectiu ha estat comunament utilitzat en el món del prototipatge ràpid, però recentment s'està començant a emprar com a tecnologia de fabricació directa per a peces amb funcionalitat limitada. Aquest fet ha comportat la creació de diverses variants a aquesta tècnica per poder adaptar-se a les sol·licitacions requerides, que són:

- *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)*. En aquesta variant, el pols de matèria prima amb la que es realitzarà l'objecte final és metall pur, sense cap tipus d'aglutinant ni de fixador, fet que permet una peça final amb les característiques pròpies del metall base; i tot el procés es realitza en una atmosfera inerta⁹. Utilitzat per crear utilitatge

⁸ "What is Selective Laser Sintering?", publicació d'Elizabeth Palermo a LiveScience.com; agost 2013

⁹ "DMLS/Direct Metal Laser Sintering", dmls.net

de forma ràpida i que requereix de plena funcionalitat, així com implants mèdics o peces aeroespacials exposades a altes temperatures.

- *Selective Heat Sintering* (SHS). Té el mateix principi de funcionament, però el pols del material és un termoplàstic i en lloc de realitzar l'increment d'energia mitjançant l'ús d'un làser, utilitza un capçal tèrmic que calenta el termoplàstic perquè aquest es sinteritzi i formi l'objecte sòlid¹⁰.
- *Selective Laser Melting* (SLM). En aquesta variant la principal diferència és que l'energia proporcionada per l'acció del làser és major (normalment s'utilitza un làser de fibra d'iterbi ,Yb), i gràcies a això es produeix una fusió completa del material, arribant a fondre's completament. Al fondre's el pols del metall de forma total el que s'aconsegueix són unes propietats completament homogènies a tota la peça¹¹.
- *Electron Beam Melting* (EBM). És un procés exactament igual que el SLM, amb les diferències de que en aquest cas la font d'energia és un raig d'electrons en comptes d'un làser de fibra d'iterbi i el procés té lloc al buit. També fon completament el metall, fet que permet obtenir una peça completament homogènia¹².

4.2. Deposició de fil fos (FDM)

És un procés que està basat en la superposició successiva d'un filament que va formant capes. Aquest filament acostuma a ser algun tipus de termoplàstic en la majoria de casos, però també pot tractar-se de cera, aliments o inclús s'estan realitzant projectes i investigacions amb cèl·lules vives per crear teixits¹³. El filament de material és extruït a través d'uns *tips* ("boquillas" o extrusors) escalfats per tal de facilitar que flueixi a través seu¹⁴. Les màquines amb tecnologia més avançada treballen amb un ambient controlat mitjançant l'ús de cambres tancades i aïllades tèrmicament, amb resistències que permeten controlar la temperatura a l'interior. El fet de treballar en un ambient controlat permet evitar problemes com la contracció/dilatació del material, tant al sortir de l'extrusor com durant tota

¹⁰ "How Selective Heat Sintering (SHS) Works", thre3d.com

¹¹ "Selective Laser Melting", twi-global.com

¹² "How Electron Beam Melting (EBM) Works", thre3d.com

¹³ "Creating Valve Tissue Using 3-D Bioprinting", publicació de Mark Crawford a asme.org (American Society of Mechanical Engineers); maig 2013

¹⁴ "Fused Deposition Modeling: Most Common 3D Printing Method", publicació d'Elizabeth Palermo a LiveScience.com; setembre 2013

la impressió. També afegeix estabilitat dimensional, ja que no es veu afectada per variacions en quant a termes d'humitat o pressió, i permet obtenir millors propietats mecàniques en la peça al quedar les successives capes millor unides entre si per estar a una temperatura pròxima a la de fusió.

Aquesta tecnologia sol requerir de la creació d'una estructura de suport en funció de la geometria de la peça a construir, y per això fa servir un segon extrusor o tip amb un material diferent al de construcció que posteriorment serà dissolt o eliminat.

Les peces obtingudes mitjançant aquesta tecnologia poden fer-se servir com a prototips o com a peces finals i funcionals. Permeten la creació d'utilatge de forma ràpida i econòmica, així com de peces estructurals amb exigents sol·licitacions mecàniques (sempre tenint en compte que es tracta de termoplàstics i no de metalls ni aliatges).

4.3. Estereolitografia (SLA)

Aquesta tecnologia de fabricació additiva està basada en la solidificació selectiva d'una resina líquida utilitzant llum, normalment ultraviolada. Aquesta resina líquida és un polímer fotosensible, és a dir, reacciona a la exposició a la llum. Hi han moltes i diverses tècniques estereolitogràfiques, però el més habitual és que la resina fotosensible es trobi en estat líquid a l'interior d'una cubeta. Un làser de llum ultraviolada ressegueix el perfil corresponent a una única capa sobre la superfície d'aquesta resina, produint la solidificació d'aquest perfil i creant una capa de l'objecte sòlid. Aleshores la safata de construcció es desplaça cap a baix la distància corresponent a l'altura d'una capa, s'afegeix més resina perquè la superfície quedi completament plana i homogènia i el làser solidifica el perfil corresponent a la segona capa. Aquest procés es va repetint capa a capa fins a realitzar l'impressió completa de la peça¹⁵.

Aquesta tècnica sol requerir de la creació d'una estructura de suport en funció de la geometria de la peça. Aquesta estructura de suport s'ha de crear amb el mateix material que el de construcció, ja que només es disposa d'una cubeta plena de resina, i posteriorment aquesta s'ha de retirar manualment. Habitualment el propi software de l'impressora sol generar aquesta estructura de suport de forma automàtica, però en cas de no ser així aquestes estructures s'han de tenir en compte a l'hora de dissenyar la peça i s'han d'incloure a l'arxiu CAD.

¹⁵ "Stereolithography", manufacturing.materialise.com

Aquesta tecnologia és àmpliament utilitzada en el món del prototipatge ràpid per la gran versatilitat en quant a forma es refereix, ja que permet crear qualsevol geometria amb una immensa precisió (sempre tenint en compte les prestacions i limitacions funcionals de cada màquina en concret). És molt utilitzada en sectors com el dental o el de la joieria. Per altra banda, degut a la composició i les propietats físiques dels fotopolímers un cop han estat curats, no sol emprar-se en la fabricació de peces funcionals.

4.4. Fabricació d'objectes per laminat (LOM)

Aquesta tecnologia està basada en la superposició de "fulles" o capes sòlides de material, que poden ser tant de paper com de plàstic o metall. Cada capa s'enganxa a la inferior, normalment mitjançant un corró a certa temperatura, i un làser la retalla per donar la forma desitjada a cada capa¹⁶. En funció del material es dona consistència a la unió entre capes de forma diferent: en el cas del paper o el plàstic es sol fer servir cola; si es tracta de polímers s'empra calor per potenciar la difusió i el sinteritzat entre capes; i en el cas de metalls es solen utilitzar soldadures o unions roscades.

La fabricació d'objectes per laminat es fa servir per crear patrons, assajos de mida o forma i per produir peces menys detallades i de poca qualitat. El principi de funcionament d'aquesta tecnologia provoca que no totes les geometries puguin ser creades, però no necessita de cap tipus d'estructura de suport ni cap reacció química, fet que abarateix enormement el seu cost.

¹⁶ "Laminated Object Manufacturing", efunda.com

5. Presentació de la tecnologia PolyJet

L'estudi realitzat en aquest projecte està basat en les impressores de tecnologia PolyJet de la marca Stratasys, tecnologia originalment creada i patentada per una empresa israeliana anomenada Objet Geometries Ltd.

5.1. Stratasys

L'empresa Stratasys neix l'any 1989 a Minnesota, Estats Units, i a l'abril de 1992 ven la seva primera impressora de tres dimensions anomenada *3D Modeler*. A partir d'aquest punt va anar creixent i desenvolupant noves màquines basades sempre en la tecnologia FDM patentada per S. Scott Crump, creador i cofundador d'Stratasys conjuntament amb la seva esposa. Després de situar-se com a principal fabricant i venedor de màquines de fabricació amb quasi la meitat del mercat mundial, al abril de 2012 s'anuncia la compra per part d'Stratasys de l'empresa israeliana Objet Geometries Ltd. D'aquesta manera adquireix també la tecnologia PolyJet de Objet, tecnologia de tipus estereolitogràfica que dona resposta a una altra part del mercat de la fabricació additiva i del prototipatge. Actualment Stratasys posseeix també l'empresa SolidScape 3D Printers, que realitza impressores 3D de tecnologia *Smooth Curvature Printing* (SCP) per produir models per a processos a la cera perduda o per a fer motllos. L'any 2013 Stratasys compra MakerBot Industries, dedicada a les impressores 3D de sobretaula i baix cost, intentant arribar a un altre tipus de mercat fins al moment inaccessible a causa de l'elevat cost de les seves màquines. Finalment, Stratasys disposa també d'un servei de fabricació digital anomenat RedEye On Demand, que facilita l'accés al món de les tecnologies de fabricació additiva¹⁷.

5.2. L'estereolitografia PolyJet

Aquesta tecnologia es una variant de les tecnologies estereolitogràfiques descrites anteriorment. S'engloba dins d'aquest grup perquè es parteix d'un polímer en estat líquid, i gràcies a l'acció de llum ultraviolada que el fa reaccionar solidifica creant una determinada forma. Aquesta tècnica però difereix enormement de totes les altres per un seguit de motius, que són els següents:

¹⁷ "About us", documentació d'Stratasys

- La resina líquida no es troba a l'interior d'una cubeta sinó que està emmagatzemada en uns cartutxos;
- La resina no solidifica per acció d'un làser selectiu sinó que és curada uniformement per una o varies làmpades UV;
- El material és dipositat de forma extremadament precisa a la safata d'impressió per uns capçals injectors, que poden estar formats per fins a 96 petits forats cada un, accionats de forma independent per electrovàlvules que realitzen el buit i controlen la impressió de cada forat;
- Gràcies a la utilització de fins a 8 capçals diferents permet en una única impressió disposar de material de suport (diferent al material de construcció) i, en les màquines de tecnologia més avançada, arribar a operar amb 3 materials de forma conjunta en la mateixa impressió.

Aquestes característiques fan que les impressores de tecnologia PolyJet de la marca Stratasys tinguin un principi de funcionament molt similar, en concepte, al de les impressores d'injecció de tinta habituals en ambients domèstics o d'oficina, doncs imprimeixen a través d'uns capçals injectors una capa líquida d'igual forma. El procés deixa de ser tan semblant quan aquesta, en lloc d'assecar-se sobre el paper és curada mitjançant la llum ultraviolada i serveix de base per a la següent capa, permetent així que la peça vagi augmentant la seva altura.

Un dels principals avantatges que presenta aquesta tecnologia en front de les altres variants de la seva mateixa família és la possibilitat de crear estructures de suport per tal de poder assolir qualsevol tipus de geometria o forma en la peça. La creació de suport és possible gràcies a la injecció per capçals independents entre si, un o varis pel material de construcció i un altre o varis altres diferents pel material de suport. L'estructura de suport és completament imprescindible en aquest tipus d'impressores, doncs al dipositar capes líquides corresponents a un determinat perfil, obtingut de seccionar la peça en capes horitzontals molt fines (podent arribar inclús a capes de tant sols 14 o 28 micres), si la capa anterior no és completament plana i homogènia en el moment d'injectar la resina aquesta precipitaria cap a la part inferior de la safata i no polimeritzaria en la posició adequada. Per garantir aquesta homogeneïtat i que la capa sigui completament plana i uniforme, conjuntament amb les làmpades UV passa un corró que neteja el possible material sobrant que hagi pogut quedar sobre la última capa de la peça, eliminant així futurs defectes en la peça definitiva associats al procés de fabricació.

La generació d'aquesta estructura de suport és un procés completament automatitzat que du a terme el propi software de la màquina de forma autònoma, de manera que l'usuari no

se n'ha de preocupar. El procés consisteix en començar a seccionar horitzontalment la peça des de la capa superior, que serà la última en imprimir-se, i a partir d'aquí anar baixant cap a la base. En el moment que detecta material de construcció en una determinada posició de la capa, automàticament omple amb material de suport aquella mateixa posició en totes les capes per sota d'aquesta. Si torna a detectar que en aquella mateixa posició però en una capa inferior necessita material de construcció perquè hi ha una altra part de peça, canvia automàticament de material, doncs el de construcció té prioritat sobre el de suport. Finalment el que s'obté del software de tractament de les peces, anomenat *Objet Studio*, és un conjunt de capes que només contempen per a cada posició si s'ha d'imprimir, i en cas afirmatiu la distinció entre material de construcció o material de suport. Un cop generat aquest conjunt de capes que formen l'objecte, l'ordinador envia un paquet inicial de quatre o vuit capes (en funció de l'impressora), i a mesura que les capes es van imprimint el controlador en va enviant més, generant així un flux constant per tal de que el procés d'impressió no s'hagi de veure interromput fins a la seva finalització.

Un cop finalitzat el procés de fabricació, per obtenir la peça final desitjada cal retirar tota aquesta estructura de suport que s'ha creat. Com ja s'ha comentat anteriorment, el procés per retirar-la que es fa servir actualment consisteix en aplicar-li aigua a pressió per aconseguir que aquest material, de propietats mecàniques inferiors a la peça definitiva, s'acabi fragmentant i desenganxant del material de construcció.

6. Caracterització i anàlisi dels materials

Els materials usats en les impressores 3D de tecnologia PolyJet són fotopolímers desenvolupats i patentats per la casa Stratasys. Un polímer és una macromolècula formada per una o varies unitats químiques, anomenades monòmers, que es van repetint al llarg d'una cadena. Quan aquest polímer és sensible a la llum, el que es coneix com a fotosensibilitat, aquest passa a anomenar-se fotopolímer en referència a aquesta característica. Existeixen diversos tipus de fotosensibilitats en funció de la longitud d'ona dels fotons que produeixen la reacció, i en aquest cas concret es tracta de fotopolímers sensibles a la llum ultraviolada, compresa per longituds d'ona d'entre 400 i 15 nanòmetres (4×10^{-7} i $1,5 \times 10^{-8}$ metres respectivament).

Al iniciar l'experimentació, la composició química dels fotopolímers és desconeguda i només és disposa d'unes dades molt genèriques sobre els principals grups que conformen les resines abans de polimeritzar així com un rang màxim del seu percentatge (per exemple: monòmer acrílic, < 30%). Stratasys no pot facilitar més informació de la que ja hi ha disponible per temes de patents i confidencialitat. L'únic que es pot afirmar a partir de la informació que contenen les fitxes tècniques dels materials és que es tracta de fotopolímers en base acrílica.

En la tecnologia PolyJet, l'estructura de suport creada no està formada únicament per material suport sinó que s'hi barreja material suport amb una petita part de material de construcció, per conferir una major duresa a aquesta estructura i que sigui capaç de suportar el pes de les capes superiors sense deformar-se. Així doncs, es comença a treballar amb les dades disponibles per el moment, i el primer que es fa és un anàlisi per espectroscòpia d'infraroig tant del material de construcció polimeritzat com del material de suport, polimeritzat sol i en presència de material de construcció (que és com està realment a la peça). L'espectroscòpia realitzada als laboratoris de l'ETSEIB va mostrar els següents resultats, observables a la Figura 2, Figura 3, Figura 4 i Figura 5.

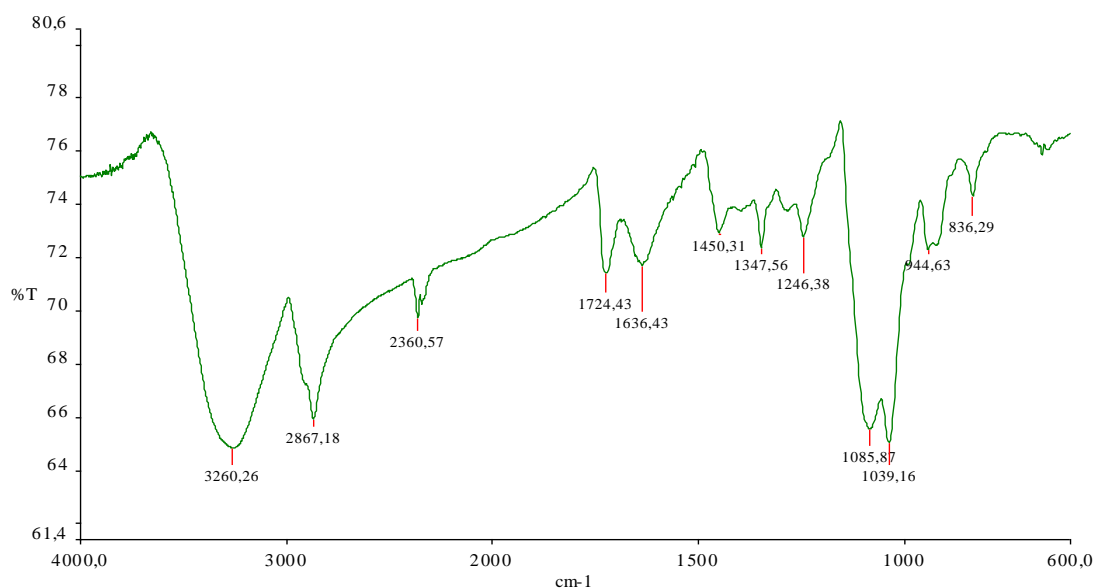


Figura 2. Espectre infraroig de l'estructura de suport polimeritzada (material suport més material construcció, SUP705 i RGD835). Font: elaboració pròpia.

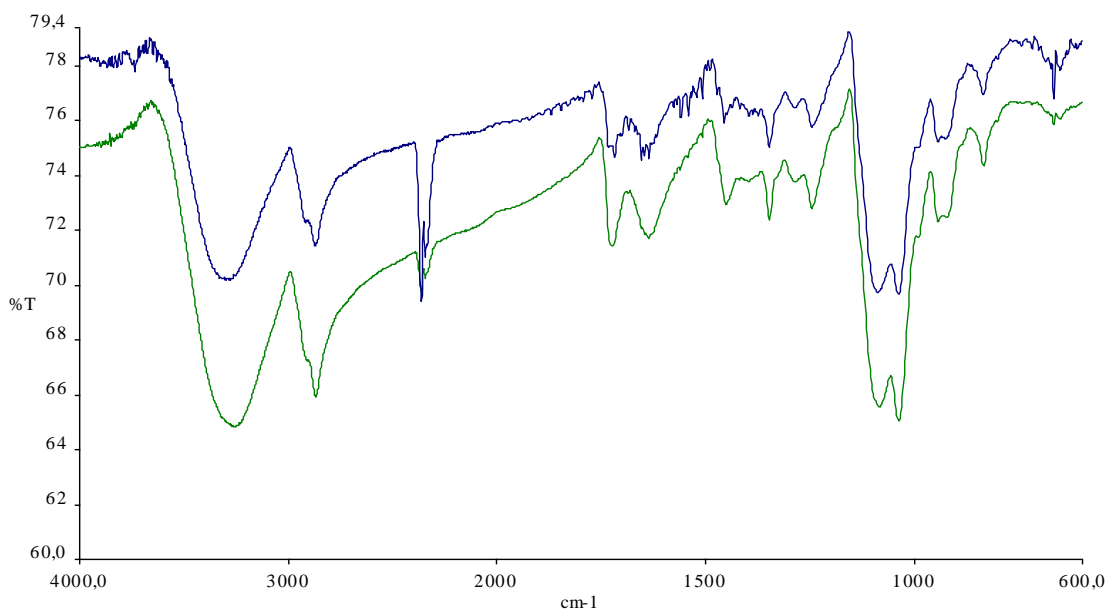


Figura 3. Espectre infraroig del material suport (SUP705) polimeritzat en presència (verd) i sense (blau) de material de construcció (RGD835). Font: elaboració pròpia.

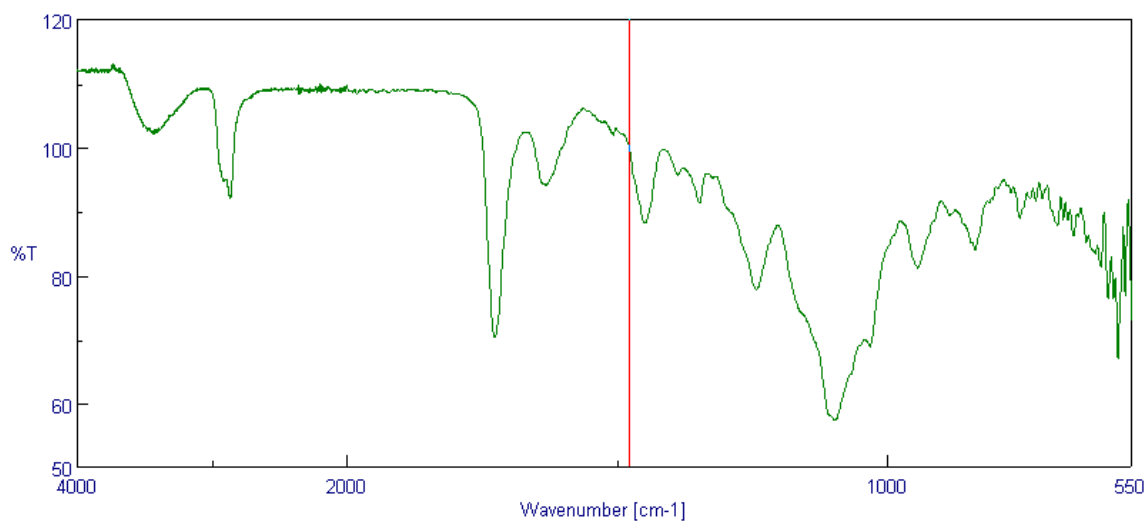


Figura 4. Espectre infraroig del material de construcció blanc polimeritzat (RGD835).
Font: elaboració pròpia.

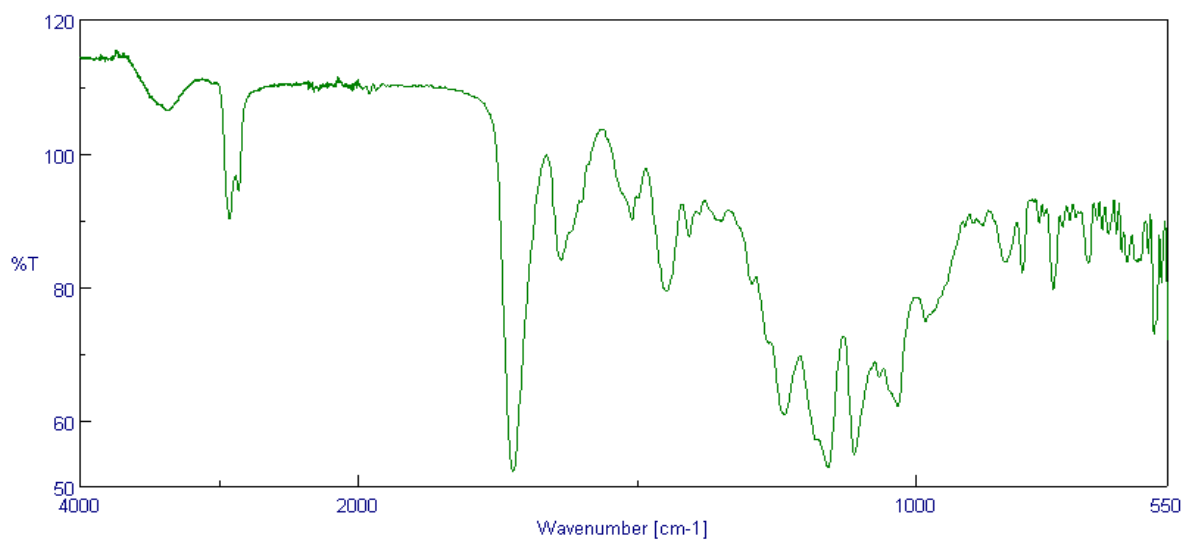


Figura 5. Espectre infraroig del material de construcció negre polimeritzat (RGD875).
Font: elaboració pròpia.

Els resultats de la caracterització han permès identificar un conjunt de factors providencials per a la experimentació, que són:

- El material de suport barrejat amb el material de construcció (que és el que realment injecten els capçals de la màquina i el que s'obté en la peça finalitzada), un cop polimeritzat té el mateix espectre que el material suport polimeritzat en solitari. Aquest fet demostra que, tot i que a nivell físic i funcional és completament necessari barrejar ambdós materials, la seva estructura química interna pràcticament no s'hi veu afectada. És per aquest motiu que d'aquí en endavant, al referir-se a material suport s'estarà tractant realment el material de suport i el material de construcció un cop han polimeritzat conjuntament, creant l'estructura de suport per a la fabricació de la peça.
- Els dos materials de construcció analitzats, el de color blanc i el de color negre (o RGD835 i RGD870 respectivament) tenen espectres molt semblants tot i tractar-se de substàncies diferents. Les dues contenen el mateix component principal, que segons l'espectre obtingut sembla ser el polímer poliacrilat d'isobornil.
- L'espectre del material de suport (barrejat o sol) és completament diferent de la dels altres dos materials de construcció analitzats. La principal diferència, i més important de cara a l'estudi que s'està realitzant, és una banda molt ampla a longitud d'ona entre 3000 i 4000 cm^{-1} , amb un màxim sobre 3260 cm^{-1} (veure Figura 2), molt més pronunciada en l'espectre del suport que en els dels materials. Aquest fet mostra que el material suport, un cop polimeritzat té grups OH orgànics en la seva estructura, i que per tant és soluble en mescles amb base aquosa.

Tenint en compte el recentment esmentat s'han analitzat diversos possibles mètodes per solucionar el problema descrit:

Una de les possibilitats és intentar trencar els enllaços moleculars del polímer que forma l'estructura de suport de manera que aquest es dissolgués completament i únicament quedés la peça definitiva. Aquesta metodologia però, presenta un seguit d'inconvenients, ja que per trencar els enllaços moleculars d'un polímer és necessària l'aportació de molta energia, i possiblement aquesta afectaria també a la peça definitiva.

L'altra opció que s'ha analitzat és aprofitar els grups OH orgànics que el material de l'estructura de suport presenta per fer-los reaccionar amb algun solvent químic de manera que les cadenes d'aquest polímer es converteixin en cadenes més grans i pesades, augmentin el seu volum i es desenganxin del polímer que forma el material de construcció, sense que aquest hi reaccioni. Aquests grups presents en el polímer de suport són solubles

en mescles o components en base aigua. Per tant, la manera d'intentar separar els dos materials és mitjançant la utilització de diversos components dissolts en aigua, especialment de bases fortes, ja que aquestes es dissocien completament en presència d'aigua i són molt reactives amb els grups OH presents en el suport.

7. Definició dels possibles tractaments

Un cop analitzades i caracteritzades les substàncies que formen les peces al ser impreses mitjançant les impressores 3D, es procedeix a investigar i aplicar diversos tractaments per intentar retirar l'estructura de suport de formes alternatives a la actual (mitjançant l'ús d'aigua a pressió directament sobre la peça). Inicialment es tenen en compte tres grans tipus de processos, que són els tractaments tèrmics, els físics i els químics.

7.1. Tractaments tèrmics

Pel que fa als tractaments tèrmics, l'aplicació directa de calor s'ha de realitzar de forma molt precisa i controlada. Estudis realitzats per la pròpia empresa Stratasys mostren que la temperatura de deformabilitat (*Heat Deflection Temperature*, HDT) és d'entre 45 i 50°C en aquests materials, i la temperatura de transició vítria T_g és d'entre 52 i 54°C¹⁸. Per tant, si no es vol afectar de forma irreversible a la peça la temperatura màxima de treball ha de ser inferior a 45°C, i sempre és recomanable deixar un marge de seguretat.

A més a més, l'aplicació per si sola de temperatura no és un factor que permeti arribar a una solució efectiva, doncs les característiques i el comportament tèrmic del material de construcció i del de suport són molt semblants, fent completament inviable intentar la separació mitjançant la fusió del material suport. Si la peça arribés a una temperatura suficientment alta com per a que això es produís, el propi material definitiu de la peça també es fondria o, si més no, perdria tota l'estabilitat dimensional i geomètrica, quedant deformada permanentment i per tant inservible.

Tot i que per si sola no és pot presentar com una aplicació funcional, si que es tindrà en compte com a factor complementari als altres possibles tractaments, doncs el fet de treballar en un ambient a temperatura afavoreix el moviment i la vibració dels àtoms. Això pot ser molt favorable al intentar desfer les unions moleculars entre el material suport i el material de construcció o directament en les pròpies unions del material de suport, accelerant significativament el procés total.

¹⁸ PolyJet™ Materials Data Sheet, Stratasys®, 2014

7.2. Tractaments físics

Dintre del camp dels tractaments físics s'inclouen tots aquells processos que tinguin a veure amb la separació física dels dos materials, sense afectar a les seves propietats ni a la seva composició química. Per tant, el producte d'un tractament físic sempre han de ser els seus reactius de forma íntegra, tot i que poden estar en diferents estats de la matèria (sòlid, líquid o gasós) i separats entre ells.

En aquest cas en concret, degut a les propietats físiques de les peces a tractar i a les seves característiques els tractaments a realitzar han de ser també molt controlats i no poden afectar a l'estabilitat física de la peça. A més a més, i com que és un dels objectius principals d'aquest estudi, els processos físics s'han de poder desenvolupar de forma autònoma sense la necessitat de que hi hagi en tot moment una persona realitzant la operació.

El procés que es fa servir actualment per a realitzar la separació de l'estructura de suport de les peces impreses és un procés físic, que com ja s'ha comentat consisteix en aplicar aigua a pressió directament sobre la superfície de la peça a netejar.

7.3. Tractaments químics

Els tractaments químics són processos mitjançant els quals una o varies substàncies es converteixen en productes finals diferents, bé sigui per un canvi en la seva composició o per un canvi de les seves propietats o funcionalitats. Dins d'aquest camp immens de possibles tractaments, s'han de destriar tots aquells que per la seva pròpia naturalesa afectin de la mateixa manera al material de construcció i a l'estructura de suport creada durant l'impressió, ja que no permetrien realitzar una separació dels dos productes.

També s'ha de controlar de forma molt precisa que els tractaments químics aplicats no afectin de cap manera al material de construcció, ja que si reaccionen al entrar en contacte amb el material aquest es veurà afectat de forma irreversible i perdrà o bé les seves propietats o bé la seva estructura i dimensions, fets tots dos inacceptables en una solució definitiva.

Finalment, i en la mesura del possible, s'ha de tenir en compte que aquests processos químics no generin productes tòxics ni extremadament perillosos per la salut, que es pugui operar amb ells i que no suposin un gran risc en quant al seu emmagatzematge.

8. Experimentació

8.1. Metodologia experimental

Per a realitzar els primers estudis s'ha realitzat el disseny d'una peça de prova mitjançant un software de CAD en tres dimensions, i s'han imprès diversos models per disposar de varies peces amb les que realitzar l'experimentació. Ha estat realitzada amb el que es coneix com a acabat mate, consistent en dipositar una capa fina, d'entre un i dos mil·límetres de gruix, d'estructura de suport al voltant de totes les superfícies, aconseguint així un acabat superficial uniforme en tota la peça. Aquesta peça disposa de varis elements concrets per facilitar la posterior lectura de resultats un cop finalitzada la prova, que són un forat passant a la part superior dreta de la figura per poder mesurar el comportament del suport quan té disponibilitat d'espai al voltant per expandir-se; una petita rebava a la part superior, per comprovar el comportament en angles rectes, així com la igualtat o no de l'eficàcia del procés tant en el sentit paral·lel com perpendicular al d'impressió; i un forat a la part inferior, per poder observar com reacciona al no disposar de més espai on expandir-se i mesurar la profunditat a la que el tractament ha aconseguit arribar. A més, aquestes peces també disposen d'unes lletres a la part superior que permeten identificar de forma fàcil i clara l'experiment al qual han estat sotmeses. Són de dimensions reduïdes per permetre la realització de varis experiments simultanis de forma fàcil i sense necessitat de disposar de gran instrumentació de laboratori. Totes les mostres han estat impreses en un material de la gamma *Rigid Opaque Materials*, concretament el VeroWhitePlus RGD835, un dels dos materials analitzats mitjançant l'espectroscòpia infraroja, i totes amb la mateixa impressora, la Objet30 Pro d'Stratasys. A la Figura 6 i Figura 7 es mostren respectivament una perspectiva superior i una altra d'inferior de la peça dissenyada.

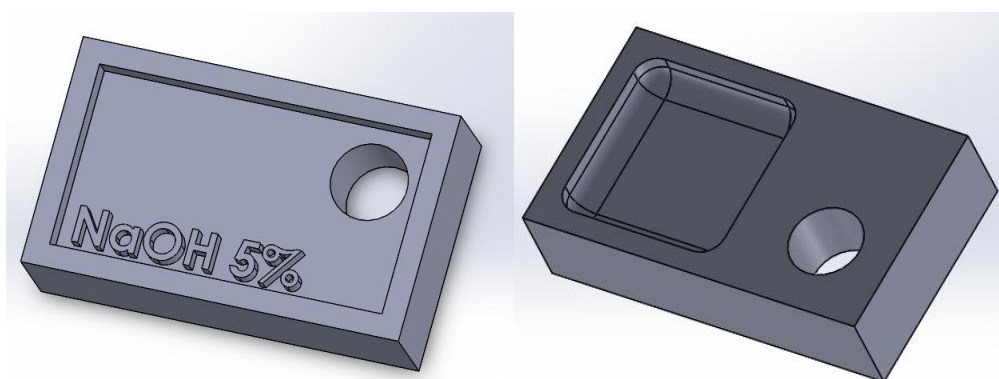


Figura 6. Perspectiva superior (imatge esquerra) i inferior (imatge dreta) de la peça dissenyada per a realitzar les probes. Font: elaboració pròpia.

Tots els experiments han estat realitzats als laboratoris de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona ETSEIB, i per a la seva realització han estat necessaris diversos vasos de precipitats de vidre de 250 ml de capacitat, una espàtula, unes pinces i una balança de precisió de mil·lèsimes de gram. Malgrat disposar d'aquesta balança amb la que s'han realitzat les mesclures, quan s'han extret dades relatives al pes amb l'experiment iniciat les mesures s'han pres amb una bàscula digital amb una precisió de dècimes de gram, al no ser necessari un grau d'exactitud tant elevat i per precaució al estar presents diversos dissolvents a la superfície de la peça.

En part dels experiments també ha estat necessària la utilització d'un aparell d'ultrasons present als laboratoris de l'ETSEIB. L'ultrasons té una potència de 420W. Els ultrasons aporten molta energia al medi en que es desenvolupen, en aquest cas aigua, i a causa d'això aquesta es calenta. Durant els experiments s'ha mesurat la temperatura cada 15 minuts, i quan aquesta superava els 38° C es buidava part de l'aigua de la cubeta i se n'introduïa de freda, per evitar que superés la HDT dels materials (45°C).

Les mesures han estat totes realitzades amb un peu de rei digital subministrat per l'empresa on s'han estat realitzant les pràctiques, amb una precisió de centèsimes de mil·límetre. Malgrat això, es considera que aquest grau de precisió és excessiu i a més a més està altament influenciat per errors induïts al realitzar la mesura de forma manual, i per tant només es pot prendre com a significativa la dècima de mil·límetre. La fiabilitat màxima d'un peu de rei és de dècimes de mil·límetre, doncs al realitzar la mesura la peça fa una força de palanca sobre el sistema de mesura, i per tant influeix i modifica la mesura real. Totes les mesures estan referenciades a la part amb major capa de suport restant o, el que és el mateix, a la zona de mínima afectació de cada cota.

Totes les mesclures que s'han realitzat en els diversos experiments i que han implicat la utilització d'aigua han estat fetes amb aigua destil·lada per garantir una igualtat de condicions en totes les experiències.

En tots els experiments en els que s'ha treballat amb hidròxid de sodi NaOH o hidròxid de potassi KOH, un cop realitzada la mescla amb les proporcions corresponents s'ha deixat reposar un mínim de cinc minuts abans d'introduir-hi la peça. La reacció de l'hidròxid de sodi o de potassi amb aigua és altament exotèrmica, és a dir, allibera una gran quantitat d'energia en forma de calor, i d'aquesta manera s'evita que la peça estigui exposada a temperatures massa elevades durant un breu període de temps.

Tots els experiments han estat realitzats a temperatura ambient (25°C aproximadament) i a una pressió d'una atmosfera (1 atm aproximadament). Tots els experiments han estat realitzats en un entorn tancat i reduït, especialment per intentar evitar la evaporació dels diversos alcohols utilitzats.

Tots els experiments han seguit la mateixa metodologia:

- Inicialment s'han preparat les mescles amb les proporcions determinades de cada reactiu en funció de l'experiment a realitzar, i s'hi ha introduït la peça de mostra determinada per a l'experiment en qüestió tenint en compte les precaucions recentment esmentades.

- S'ha deixat la mostra un temps de tres hores dins de la mescla. Un cop transcorregut aquest període, s'ha extret la mostra de la mescla i s'ha dipositat en una cubeta amb aigua per netejar-la superficialment dels components de la mescla i poder realitzar les mesures pertinents.

- Un cop realitzades, la peça s'ha tornat a introduir a la mescla en la que s'estava realitzant l'experimentació, i s'ha deixat fins a completar un temps total de quaranta-vuit hores. Un cop transcorregut aquest període, s'ha extret la mostra de la mescla i s'ha dipositat en una cubeta amb aigua per netejar-la superficialment dels components de la mescla i poder realitzar les mesures pertinents.

S'ha realitzat aquest procés per dos motius: el primer es permetre comprovar el comportament i els resultats obtinguts amb un temps relativament curt, el que s'entendria per una molt bona solució definitiva a la problemàtica que s'intenta resoldre. Una solució òptima hauria de necessitar un màxim de quatre hores per poder eliminar de forma total l'estructura de suport; una bona solució podria prendre entre quatre i dotze hores, i qualsevol temps superior a les dotze hores és inacceptable com a solució ja que no permet la seva implementació. Per altra banda, el fet de deixar les mostres un total de quaranta-vuit hores dins de la mescla permet observar si aquesta és abrasiva i afecta al material de construcció definitiu amb el pas del temps, ja que si s'hi veu afectat la mescla en qüestió no es pot considerar com a solució factible.

Inicialment abans d'iniciar qualsevol tractament s'han realitzat una sèrie de mesures a cada peça, ja que aquestes estan lleugerament influenciades pel procés de construcció i no són totes exactament idèntiques. Per a realitzar la mesura de l'efectivitat del tractament per a la retirada del material suport inicialment s'ha realitzat una inspecció visual, i posteriorment s'han realitzat un conjunt de mesures a fi de poder comparar la peça al inici i al final del tractament.

8.2. Procés experimental

8.2.1. Assajos en medi aquós

La primera experiència que s'ha realitzat és la de dissoldre hidròxid de sodi NaOH en aigua amb diverses proporcions (5%, 10%, 15%, 20% i 25% en pes), per observar la reactivitat tant del material de construcció com de l'estructura de suport en presència d'aquestes mesclures.

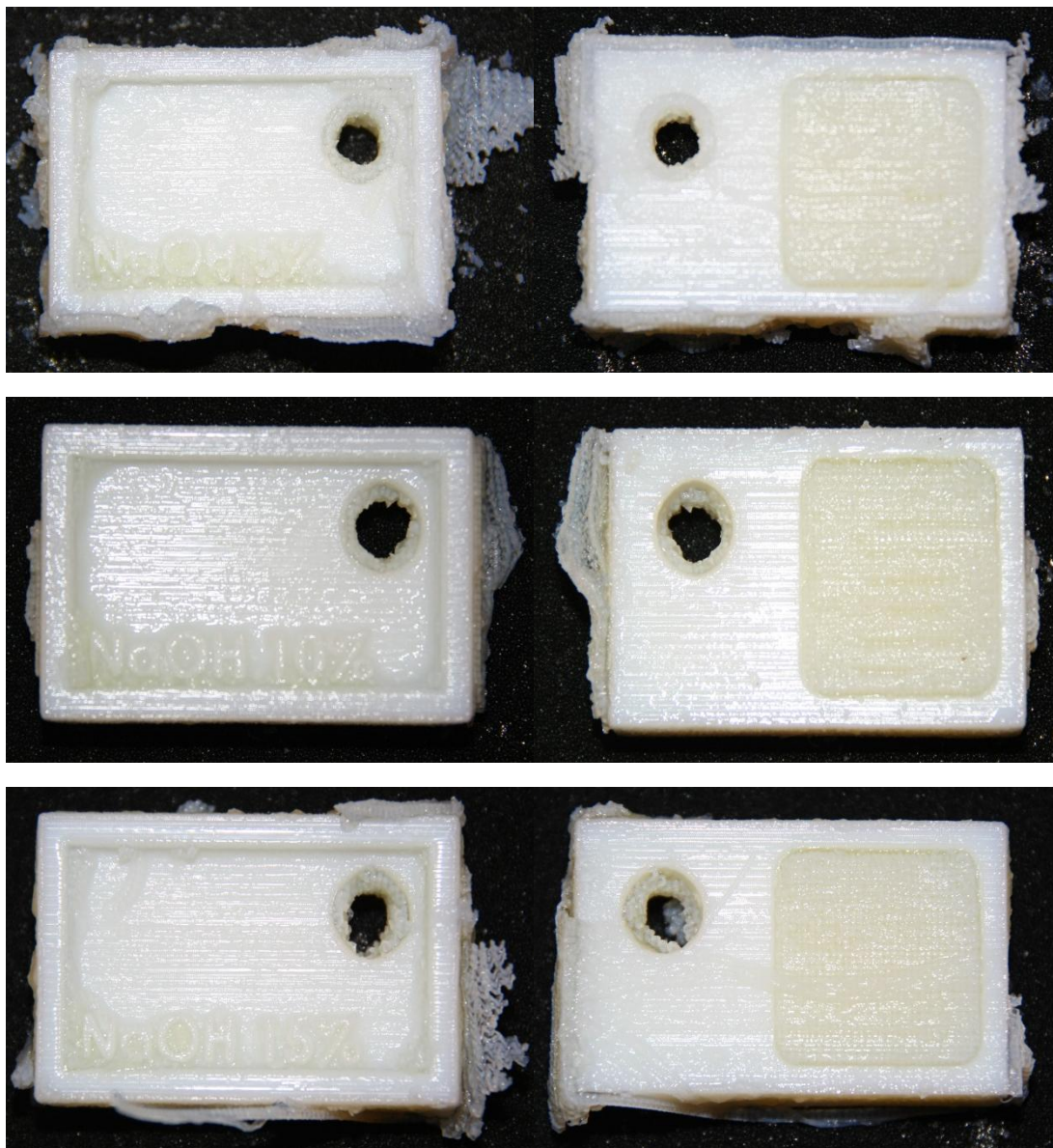
| SENSE TRACTAMENT | NaOH 5% | NaOH 10% | NaOH 15% | NaOH 20% | NaOH 25% |
|-------------------------|---------|----------|----------|----------|----------|
| Llargada [mm] | 53,11 | 53,06 | 53,13 | 53,15 | 53,7 |
| Amplada [mm] | 33,1 | 32,95 | 32,99 | 33,03 | 33,05 |
| Altura [mm] | 14,43 | 14,53 | 14,46 | 14,42 | 14,59 |
| Ø _{forat} [mm] | 6,95 | 6,9 | 6,92 | 6,93 | 7,03 |
| Rebava superior [mm] | 3,13 | 3,12 | 3,21 | 3,08 | 3,33 |
| Profunditat total [mm] | 11,46 | 11,8 | 11,69 | 11,68 | 11,63 |
| Pes [g] | 26,9 | 27 | 27,2 | 27,1 | 27 |

Taula 1. Mesures de les peces per a la experimentació amb hidròxid de sodi abans de la realització del tractament. Font: elaboració pròpia.

| 3 HORES | NaOH 5% | NaOH 10% | NaOH 15% | NaOH 20% | NaOH 25% |
|-------------------------|---------|----------|----------|----------|----------|
| Llargada [mm] | 52,85 | 52,08 | 52,65 | 54,2 | 53,63 |
| Amplada [mm] | 32,88 | 30,32 | 31,23 | 32,55 | 33,05 |
| Altura [mm] | 13,45 | 13,51 | 13,7 | 14,78 | 12,96 |
| Ø _{forat} [mm] | 7,97 | 8,54 | 8,68 | 6,61 | 6,68 |
| Rebava superior [mm] | 3,07 | 2,99 | 3,28 | 3,15 | 3,13 |
| Profunditat total [mm] | 11,95 | 11,28 | 11,49 | 10,87 | 11,58 |
| Pes [g] | 25,3 | 22,5 | 22,2 | 23,6 | 28,1 |
| Comentaris | - | 1) | 1) | 1) | 2) |

Taula 2. Mesures de les peces al haver transcorregut tres hores des de l'inici de l'experimentació amb hidròxid de sodi. Font: elaboració pròpia.

- 1) Suport molt tou, en entrar amb contacte amb l'aigua es desfà. Dificultat de mesurar a causa de l'estovament.
- 2) Molt menys afectat que els de concentració inferior. En sentit paral·lel al pla d'impressió molt afectat, en sentit perpendicular molt poc.



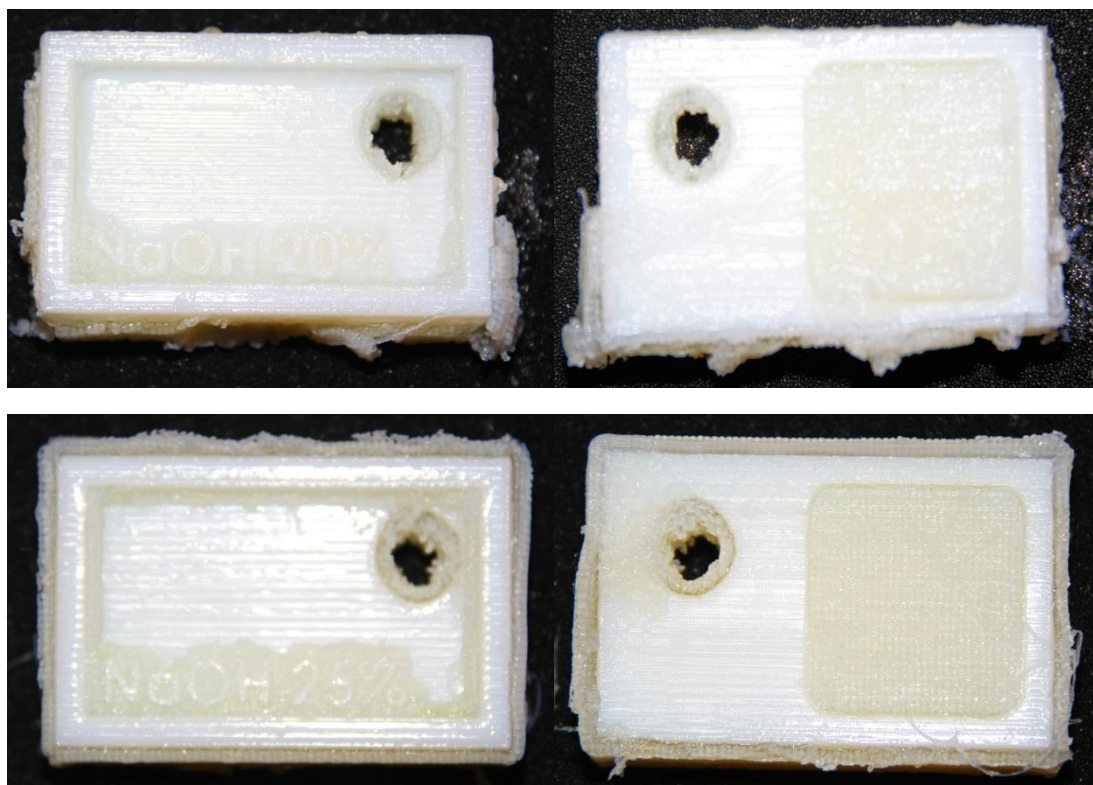


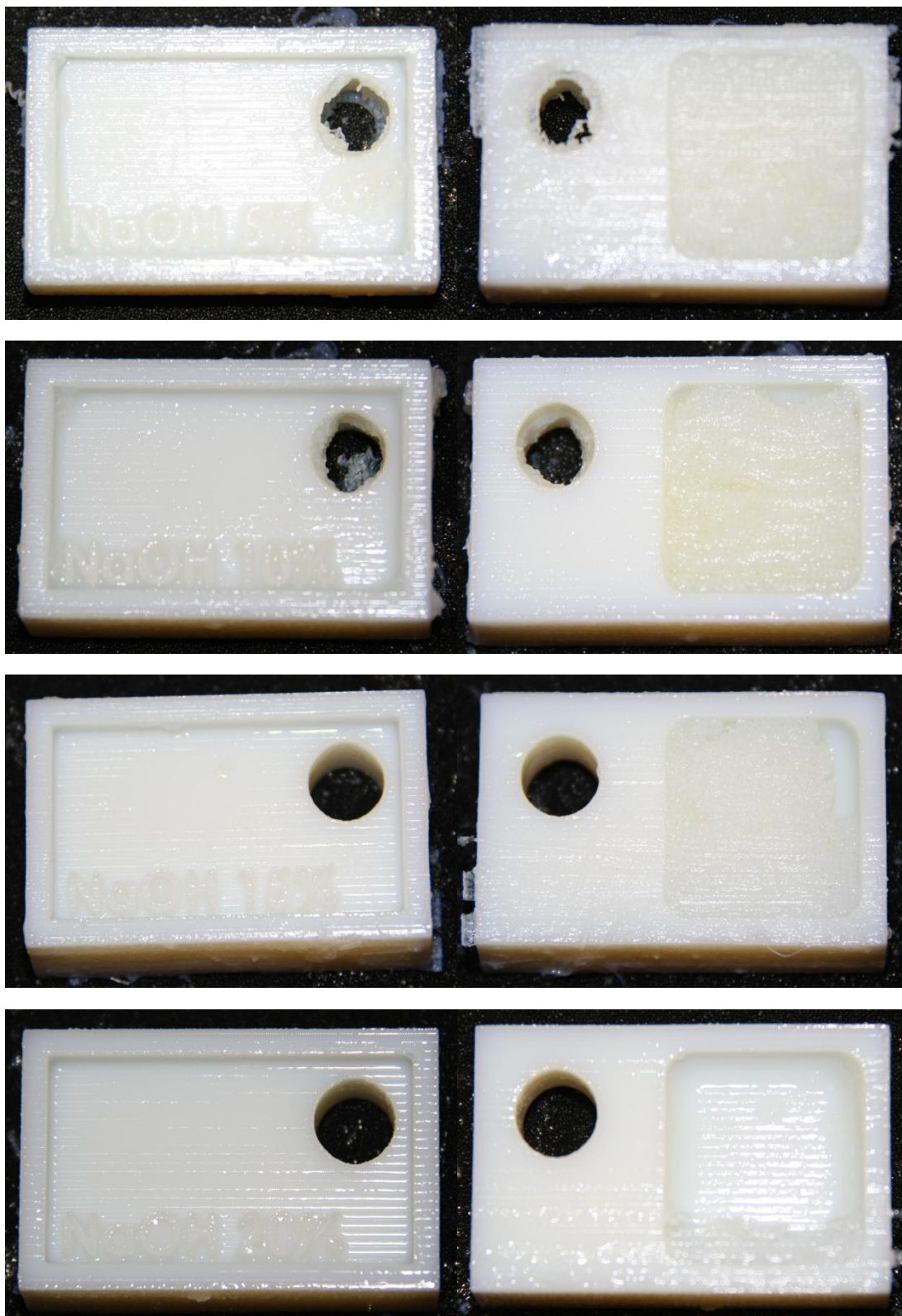
Figura 7. Perspectiva superior i inferior de les peces al haver transcorregut tres hores des de l'inici de l'experimentació. Concentracions (de dalt a baix): 5%, 10%, 15%, 20%, 25%. Font: elaboració pròpia.

| 48 HORES | NaOH 5% | NaOH 10% | NaOH 15% | NaOH 20% | NaOH 25% |
|-------------------|---------|----------|----------|----------|----------|
| Pes [g] | 20,8 | 20,3 | 19,4 | 16,7 | 17,1 |
| Comentaris | 1) | 2) | 3) | 4) | 5) |

Taula 3. Dades extretes a la finalització de l'experiment amb hidròxid de sodi. Font: elaboració pròpia.

- 1) Material no afectat. Suport del forat inferior molt tou. Encara queda suport al forat rodó passant.
- 2) Material no afectat. Suport molt tou. Queda molt poc suport fora del forat inferior.
- 3) Material no afectat. Suport del forat inferior es desfà sol.
- 4) Material no afectat. 90% del forat inferior net.

5) Material no afectat. 80% del forat inferior net.



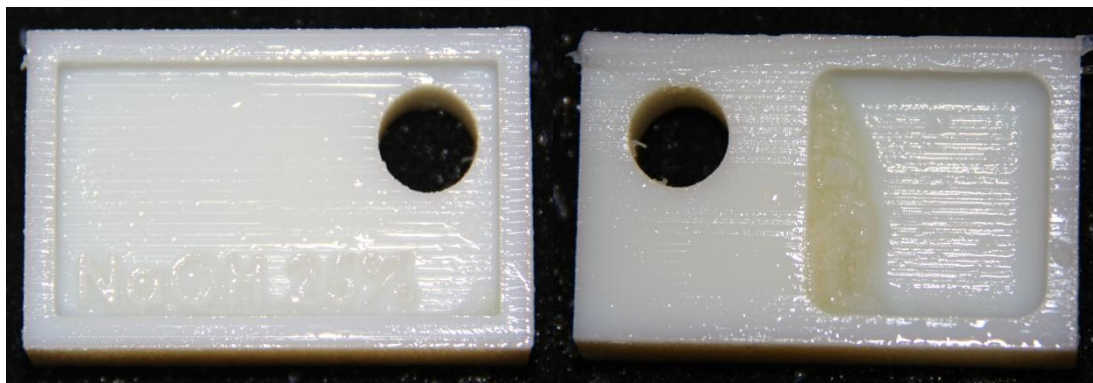


Figura 8. Perspectiva superior i inferior de les peces al haver transcorregut quaranta-vuit hores des de l'inici de l'experimentació. Concentracions (de dalt a baix): 5%, 10%, 15%, 20%, 25%. Font: elaboració pròpia.

Les conclusions que s'han pogut extreure d'aquesta primera experimentació han estat les següents:

- L'hidròxid de sodi NaOH dissolt en aigua ha aconseguit uns bons resultats a l'hora de netejar la peça. El que aquesta mescla realitza sobre el material suport és reaccionar amb els grups OH orgànics creant cadenes polimèriques mes grans, per la qual cosa aquest s'infla i augmenta el seu volum. Durant les primeres tres hores es pot observar que en augmentar la concentració de la mescla s'infla més l'estructura de suport i es comença a desprendre, amb excepció de la concentració al 25% en la qual la peça s'ha vist molt menys afectada que amb concentracions menors. El fet d'inflar-se provoca que inclús havent-se començat a desprendre les capes superficials més externes, hi hagin dimensions de la peça majors que en el seu estat inicial (dimensions absolutes com l'allargada o l'amplada); o més petites, com en el cas del diàmetre interior del forat passant que al inflar-se el suport al seu voltant el fa disminuir. Aquest fet és també observable en el pes de les peces, doncs en totes, a excepció de la mescla al 25%, s'ha vist disminuït, indicant així que part de l'estructura de suport s'ha desenganxat.

- Al observar les peces un cop transcorregudes les quaranta-vuit hores de duració de l'experiment, cap d'elles havia estat afectada per la mescla, ni a nivell superficial ni dimensional. Les peces corresponents a les concentracions del 20 i 25% estaven completament netes a excepció del forat de la part inferior, que en el cas de la primera havia estat netejat en aproximadament un 90% de tot el seu volum i en el de la segona en aproximadament un 75%. A concentracions inferiors la eficàcia de la mescla es va reduït: la peça al 15% està pràcticament neta menys l'interior del forat, que estava molt tou i s'ha començat a desprendre però molt poca part; en la del 10% quedava una petita part de

suport fora del forat inferior; i en la del 5% hi havia encara estructura de suport en el forat passant i en la superfície superior.

Paral·lelament a la realització d'aquest primer experiment també s'han realitzat estudis de comportament amb altres dissolucions en base aquosa: lleixiu pur, que té com a component actiu l'hipoclorit de sodi NaClO; lleixiu dissolt en aigua al 50% en pes, amb el que es forma NaClO i NaOH; aigua amb sabó de la marca Fairy, caracteritzat per la seva formulació amb barreja de tensioactius neutres aniònics i catiònics; i alcohol etílic de 96°.

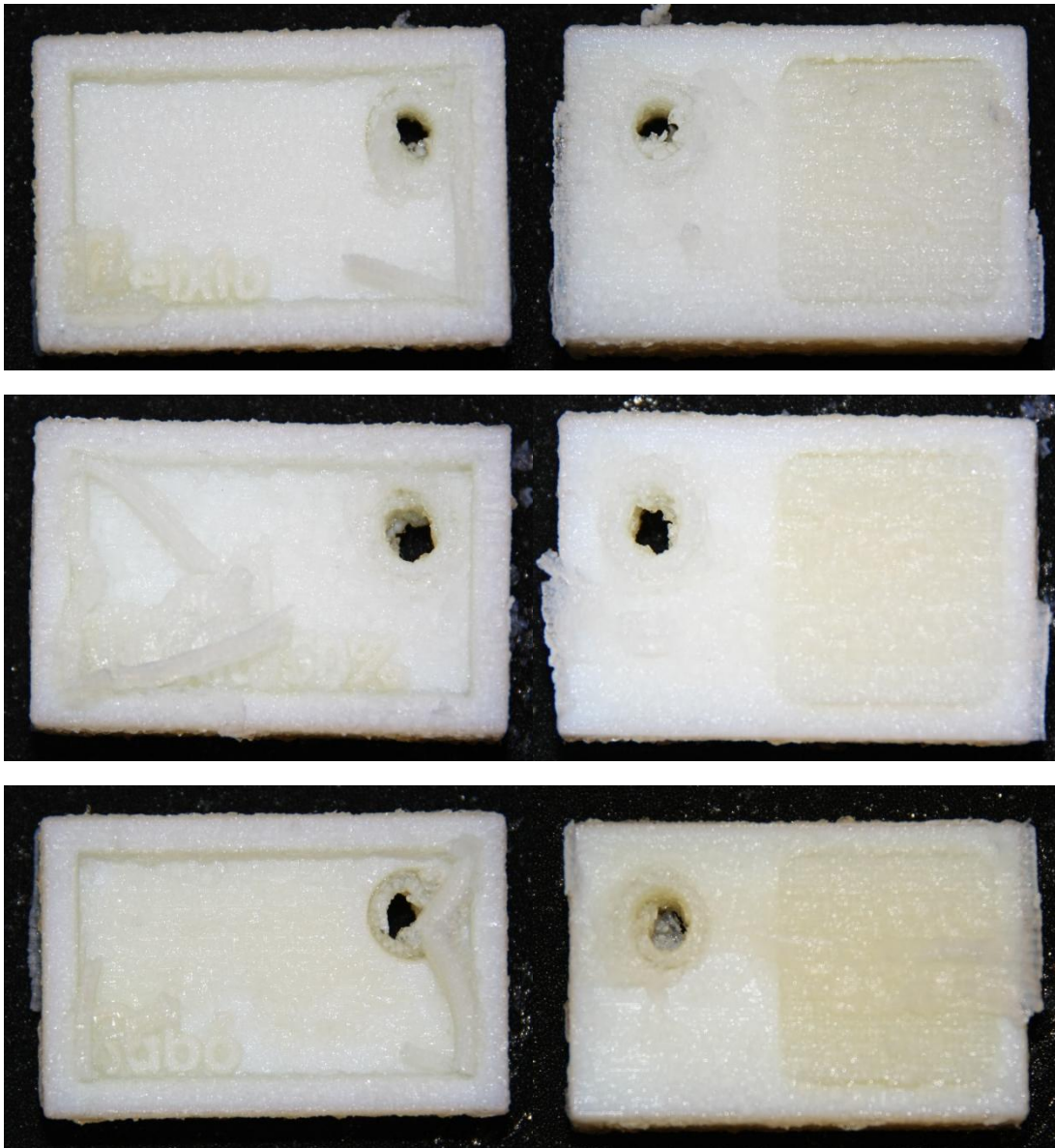
| SENSE TRACTAMENT | Lleixiu pur | Lleixiu 50% | Sabó | Alcohol 96° |
|-------------------------------|--------------------|--------------------|-------------|--------------------|
| Llargada [mm] | 53,12 | 53,18 | 53,54 | 53,14 |
| Amplada [mm] | 33,15 | 33,09 | 33,32 | 33,08 |
| Altura [mm] | 14,35 | 14,35 | 14,33 | 14,65 |
| Ø_{forat} [mm] | 6,95 | 6,87 | 6,94 | 6,89 |
| Rebava superior [mm] | 3,06 | 3,28 | 3,23 | 3,23 |
| Profunditat total [mm] | 11,67 | 11,66 | 11,82 | 11,81 |
| Pes [g] | 27,1 | 27,2 | 26,9 | 27,3 |

Taula 4. Mesures de les peces per a la experimentació amb dissolucions aquoses abans de la realització del tractament. Font: elaboració pròpia.

| 3 HORES | Lleixiu pur | Lleixiu 50% | Sabó | Alcohol 96° |
|-------------------------------|--------------------|--------------------|-------------|--------------------|
| Llargada [mm] | 50,95 | 51,56 | 50,88 | 50,91 |
| Amplada [mm] | 31,49 | 30,92 | 30,83 | 30,93 |
| Altura [mm] | 15,51 | 15,99 | 13,45 | 13,74 |
| Ø_{forat} [mm] | 5,61 | 5,99 | 6,32 | 9,21 |
| Rebava superior [mm] | 3,4 | 2,93 | 3,55 | 2,77 |
| Profunditat total [mm] | 13,09 | 11,64 | 12,17 | 11,35 |
| Pes [g] | 24,6 | 26 | 26,8 | 22,8 |
| Comentaris | 1) | 1) | 2) | 3) |

Taula 5. Mesures de les peces al haver transcorregut tres hores des de l'inici de l'experimentació amb dissolucions aquoses. Font: elaboració pròpia.

- 1) Es desenganxa en forma de lames molt toves.
- 2) Salta en forma de lames o capes contínues en general. Afecta capes molt fines, només a la superfície.
- 3) Suport tou que es comença a desprendre de la peça.



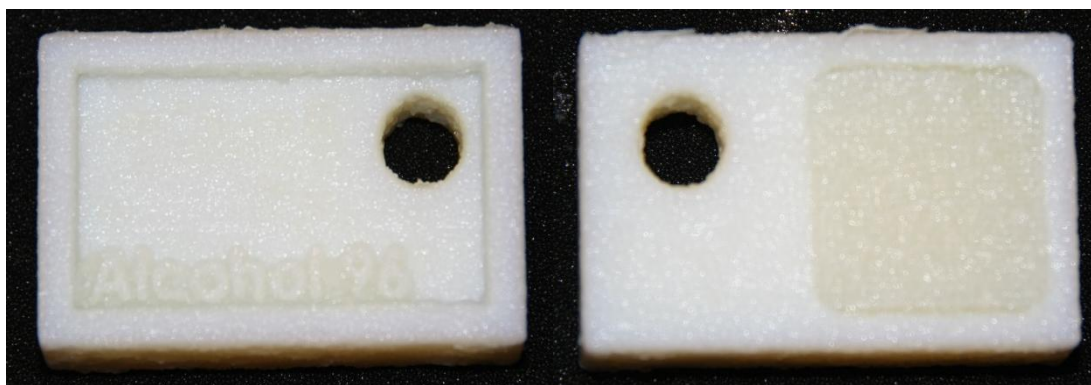
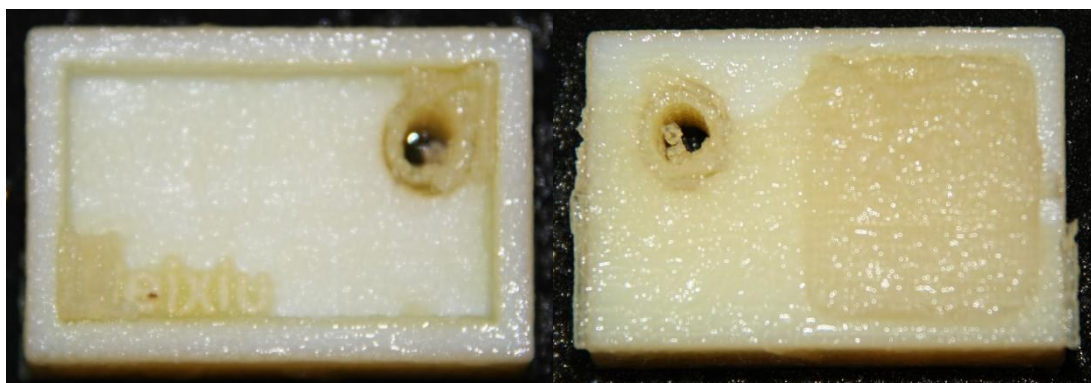


Figura 9. Perspectiva superior i inferior de les peces al haver transcorregut tres hores des de l'inici de l'experimentació. Tractaments (de dalt a baix): lleixiu, lleixiu 50%, aigua amb sabó i alcohol etílic 96°. Font: elaboració pròpia.

| 48 HORES | Lleixiu pur | Lleixiu 50% | Sabó | Alcohol 96° |
|-------------------|-------------|-------------|------|-------------|
| Pes [g] | 24,6 | 25,2 | 25,7 | 22,3 |
| Comentaris | 1) | 1) | 2) | 3) |

Taula 6. Dades extretes a la finalització de l'experiment amb dissolucions aquoses. Font: elaboració pròpia.

- 1) Reacciona amb el material de construcció.
- 2) Suport molt inflat. Queda molt suport a la peça.
- 3) Material definitiu afectat. Queda molt suport a la peça



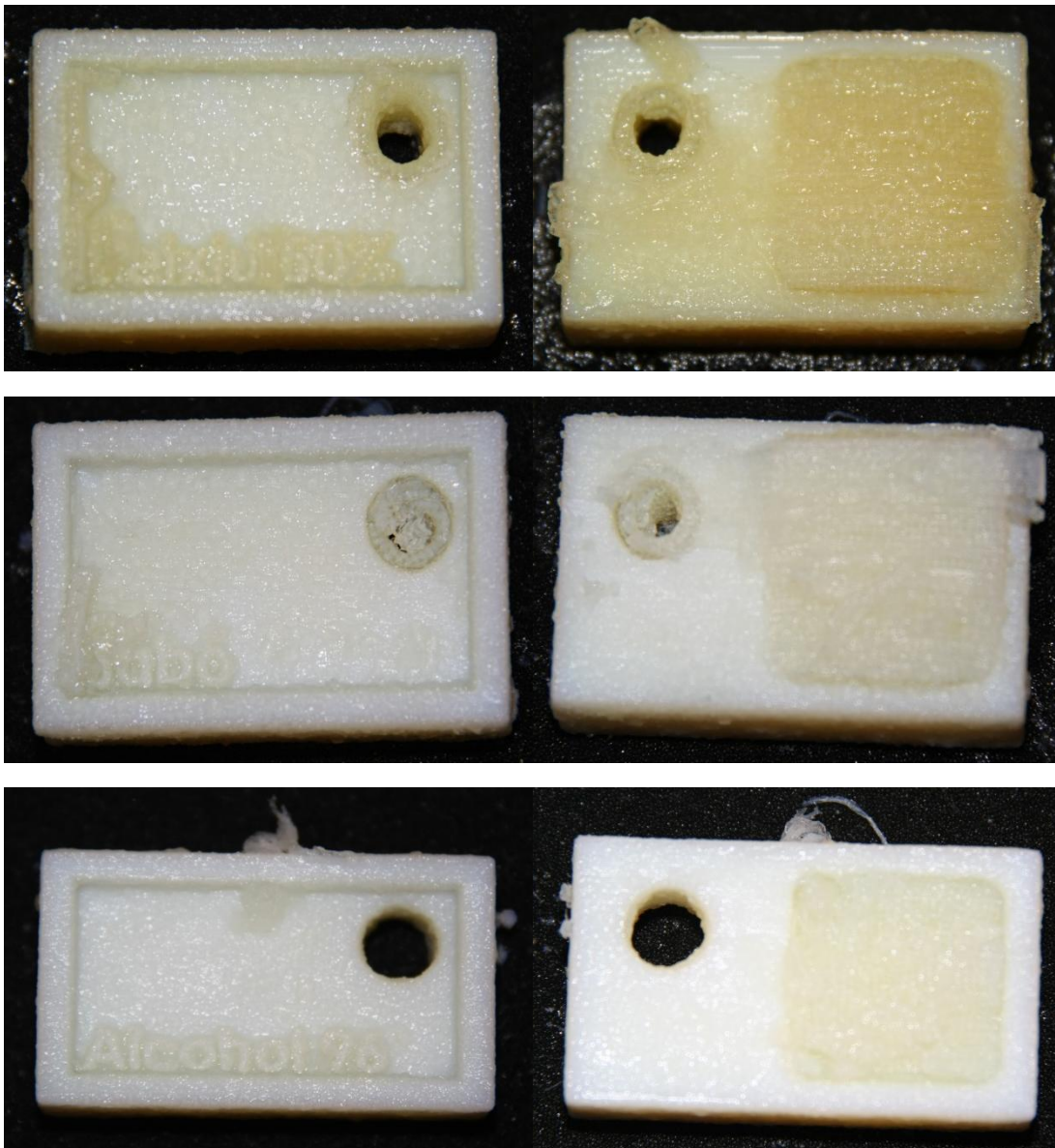


Figura 10. Perspectiva superior i inferior de les peces al haver transcorregut quaranta-vuit hores des de l'inici de l'experimentació. Tractaments (de dalt a baix): lleixiu, lleixiu 50%, aigua amb sabó i alcohol etílic 96°. Font: elaboració pròpia.

Les conclusions que s'han pogut extreure d'aquesta experimentació són les següents:

- Pel que fa a l'hipoclorit de sodi, tant sol com dissolt en aigua queda descartat automàticament ja que afecta a les peces definitives. El NaClO és un oxidant de naturalesa forta que ataca i reacciona tant amb l'estructura del material de suport com amb la peça definitiva en si mateixa, afectant a l'estructura del polímer de construcció. Durant les primeres tres hores funciona bastant bé, estovant molt el material i fent que es desprengui

de forma més o menys uniforme en forma de fines lames; però al deixar la peça durant un període de temps major dins la mescla s'estova el material de construcció definitiu i a més agafa un color grogenc, fet que indica que ha reaccionat químicament amb el lleixiu. S'ha descartat la caracterització dels canvis químics ocasionats en l'estructura de les peces.

- Durant les tres primeres hores l'aigua amb sabó fa saltar el suport en forma de fines lames i capes bastant contínues, però afecta només a la part més superficial de la peça. Amb el pas del temps el suport s'infla molt, però no es desprèn de la peça. Al finalitzar l'experiment encara hi ha molt suport adherit a totes les superfícies, i ha augmentat molt el seu volum i pes.

- Com a últim reactiu d'aquesta primera fase de l'experimentació s'ha utilitzat també l'alcohol etílic de 96°. Al transcórrer les tres primeres hores el comportament de la mescla ha estat bastant correcte, estovant una bona part de l'estructura de suport del voltant de la peça i fent que aquest es despregués, però al realitzar la inspecció al cap de quaranta-vuit hores s'ha hagut de descartar perquè el material definitiu havia estat afectat. A més a més encara quedava una part important d'estructura de suport en la peça.

A la vista dels bons resultats obtinguts amb l'experimentació de l'hidròxid de sodi dissolt en aigua, s'ha procedit a realitzar una rèplica del mateix experiment amb hidròxid de potassi KOH, una altra base forta de comportament molt similar al de l'hidròxid de sodi. S'han realitzat mescles amb les mateixes concentracions, des d'un 5 a un 25% en pes.

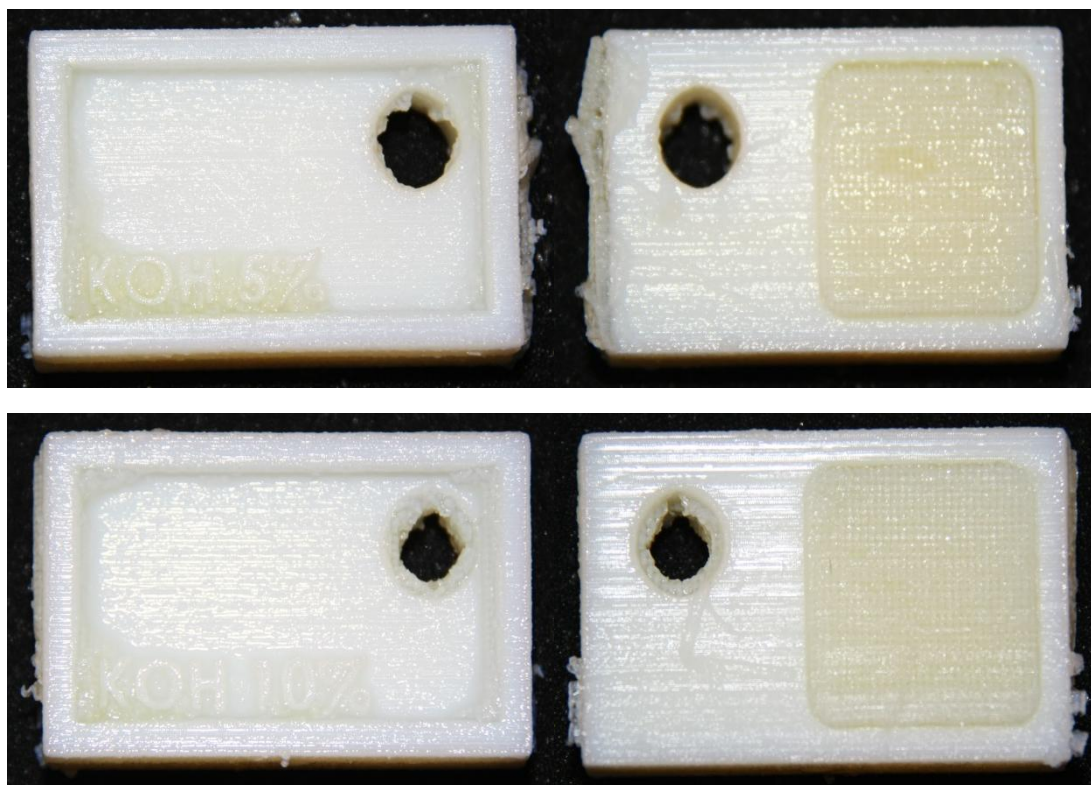
| SENSE TRACTAMENT | KOH 5% | KOH 10% | KOH 15% | KOH 20% | KOH 25% |
|-------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Llargada [mm] | 53,16 | 53,2 | 53,22 | 53,19 | 53,24 |
| Amplada [mm] | 33,1 | 33,12 | 32,99 | 33,16 | 33,13 |
| Altura [mm] | 14,37 | 14,5 | 14,56 | 14,49 | 14,52 |
| Ø _{forat} [mm] | 6,97 | 6,85 | 6,99 | 6,98 | 6,92 |
| Rebava superior [mm] | 3,33 | 3,19 | 3,16 | 3,18 | 3,32 |
| Profunditat total [mm] | 11,69 | 11,88 | 11,6 | 11,64 | 11,73 |
| Pes [g] | 27 | 27,1 | 27,1 | 27,2 | 27 |

Taula 7. Mesures de les peces per a la experimentació amb hidròxid de potassi abans de la realització del tractament. Font: elaboració pròpia.

| 3 HORES | KOH 5% | KOH 10% | KOH 15% | KOH 20% | KOH 25% |
|-------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Llargada [mm] | 50,17 | 50,65 | 52,22 | 53,55 | 52,73 |
| Amplada [mm] | 30,48 | 30,47 | 31,56 | 30,66 | 32,05 |
| Altura [mm] | 13,61 | 12,93 | 13,93 | 14,18 | 14,43 |
| Ø _{forat} [mm] | 9,68 | 7,99 | 8,07 | 7,6 | 7,43 |
| Rebava superior [mm] | 3,3 | 3,06 | 3,58 | 3,08 | 3,56 |
| Profunditat total [mm] | 11,27 | 10,71 | 10,87 | 10,85 | 10,76 |
| Pes [g] | 22,5 | 21,3 | 21,5 | 21,9 | 22,4 |
| Comentaris | 1) | 1) | 2) | 2) | 1) |

Taula 8. Mesures de les peces al haver transcorregut tres hores des de l'inici de l'experimentació amb hidròxid de potassi. Font: elaboració pròpia.

- 1) Suport bastant tou.
- 2) Suport molt tou, salta amb l'aigua.



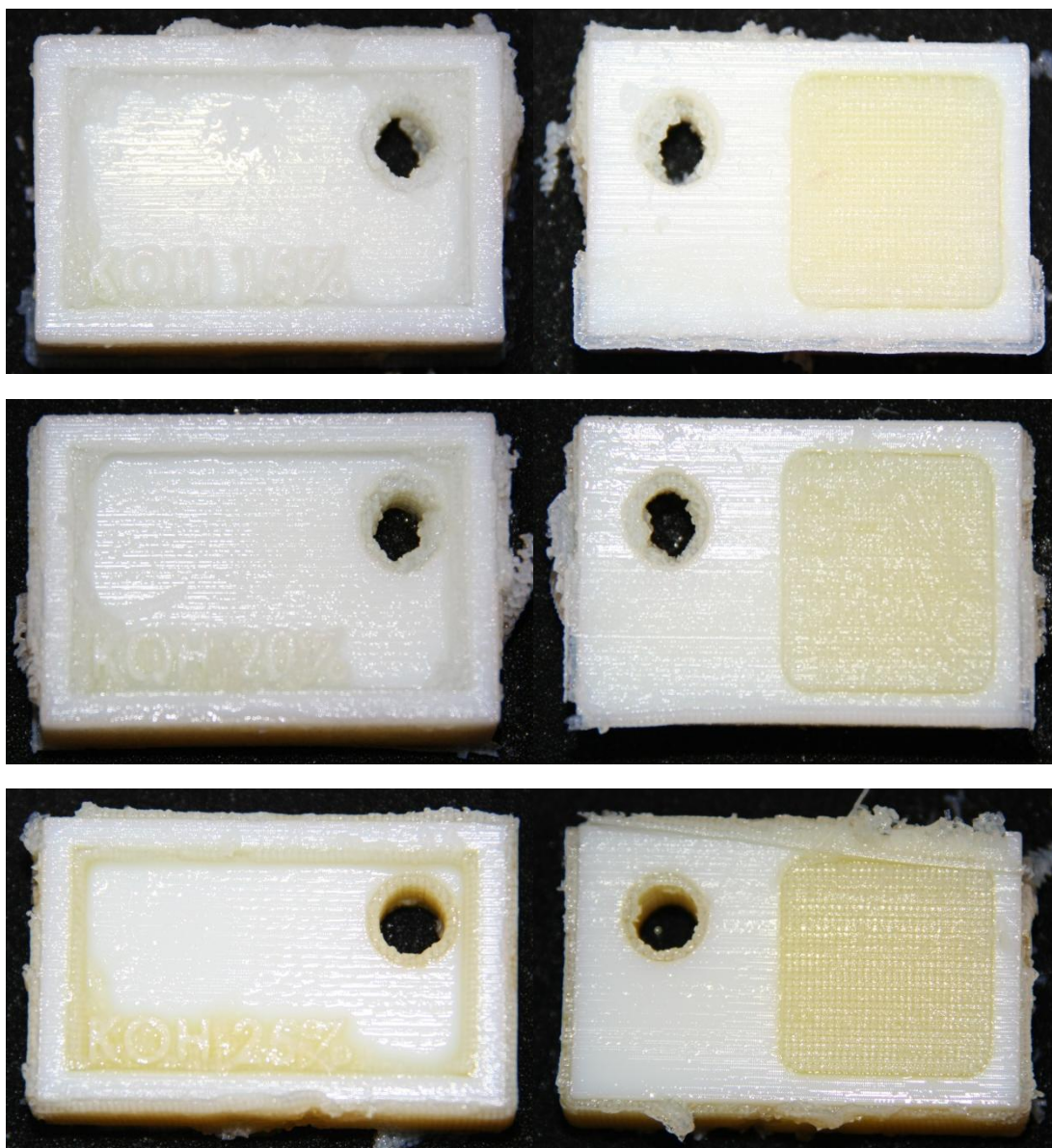
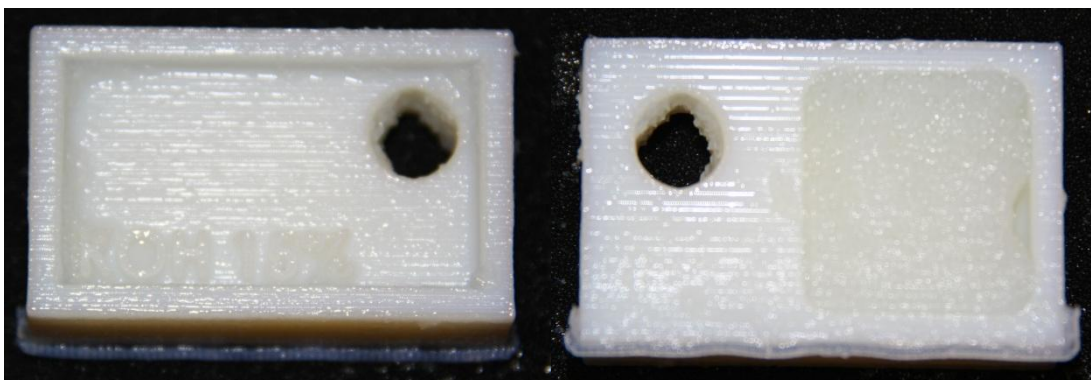
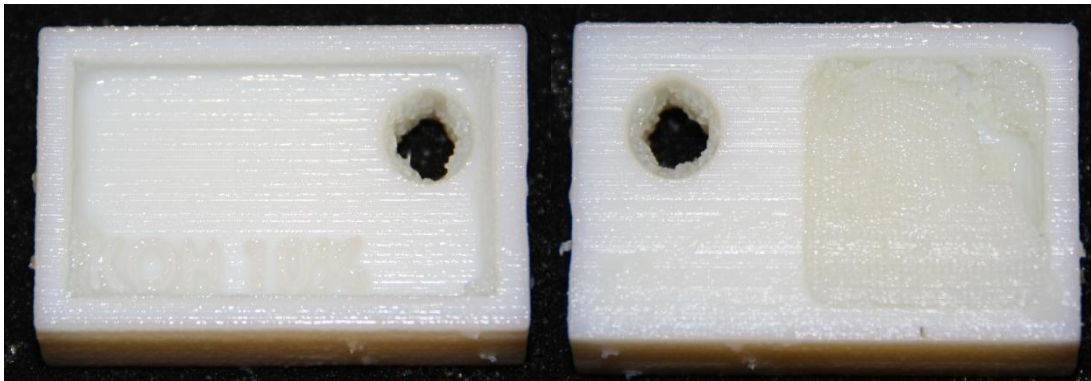
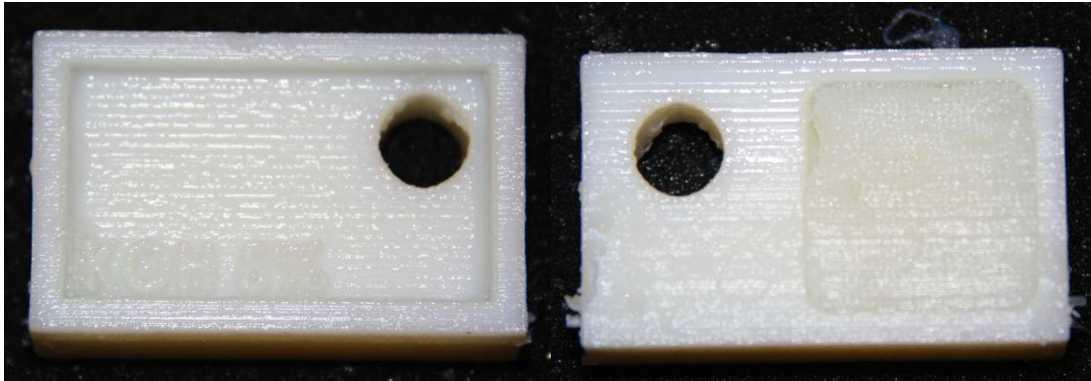


Figura 11. Perspectiva superior i inferior de les peces al haver transcorregut tres hores des de l'inici de l'experimentació. Concentracions (de dalt a baix): 5%, 10%, 15%, 20%, 25%. Font: elaboració pròpia.

| 48 HORES | KOH 5% | KOH 10% | KOH 15% | KOH 20% | KOH 25% |
|------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Pes [g] | 21,4 | 20,9 | 21 | 20,4 | 20,6 |
| Comentaris | 1) | 2) | 3) | 3) | 4) |

Taula 9. Dades extretes a la finalització de l'experiment amb hidròxid de potassi. Font: elaboració pròpia.

- 1) Material definitiu afectat. Interior del forat inferior bastant dur
- 2) Material definitiu afectat. Encara queda suport al forat rodó passant.
- 3) Material definitiu afectat. Suport del forat inferior molt tou.
- 4) Material definitiu afectat. Interior del forat inferior bastant net.



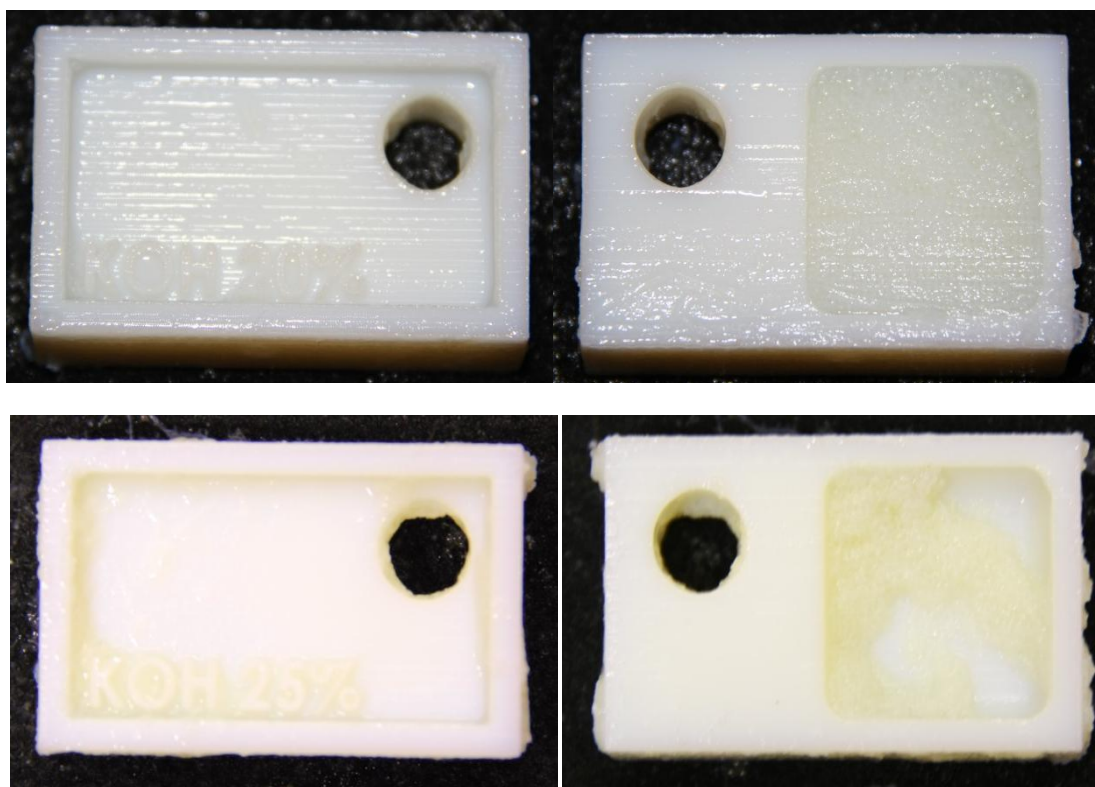


Figura 12. Perspectiva superior i inferior de les peces al haver transcorregut quaranta-vuit hores des de l'inici de l'experimentació. Concentracions (de dalt a baix): 5%, 10%, 15%, 20%, 25%. Font: elaboració pròpia.

Les conclusions que s'han pogut extreure d'aquesta experimentació han estat les següents:

- Inicialment l'hidròxid de potassi estava molt més l'estructura de suport que el de sodi, i aquesta es desprèn d'una forma molt més ràpida i efectiva. El comportament també és diferent que en l'experimentació amb sodi, doncs en lloc d'inflar-se inicialment per després començar a desprendre's, en aquest cas s'estava molt sense inflar-se gaire, i es comença a desprendre abans. Aquest comportament es pot observar clarament en el pes, inferior en tots els casos als dels seus equivalents en hidròxid de sodi, i en totes les seves dimensions.

- Malgrat aquest comportament a priori més beneficiós, al passar les quaranta-vuit hores el material definitiu en totes les peces estava afectat, independentment de la concentració. És per aquest motiu que es descarta qualsevol tipus de tractament en el que s'hi vegi involucrat l'hidròxid de potassi.

8.2.2. Assajos amb barreges hidroalcohòliques

En observar que les mescles en base aquosa no eren per si soles suficients a l'hora de separar de manera complerta els dos materials, es va procedir a operar amb diversos alcohols. A les fulles tècniques del material de suport apareixen com a components bastant abundants tant el propilenglicol com el polietilenglicol (PEG), components presents en la fase líquida de la resina però que no apareixen quan el suport polimeritza. Aquests dos components tenen cadenes molt més llargues i complexes que l'alcohol etílic usat en la primera experimentació, i els dos són àmpliament utilitzats en el món de la indústria com a dissolvents. A més, al trobar-se ambdós en presència del material suport quan aquest encara no ha polimeritzat pot ajudar a evitar que les cadenes del polímer acrílic s'endureixin, o en cas que ja hagin polimeritzat pot jugar un paper important a l'hora d'estovar el material. També s'han tingut en compte aquests dos dissolvents pel fet de que en les composicions dels diversos materials de construcció no hi apareixen, a diferència que en els de suport, o si hi apareixen es en proporcions ínfimes (menys d'un 0,15%). Aquests dos alcohols també són solubles en aigua, pel que s'han realitzat dos experiments amb els alcohols sols i dos més amb els alcohols dissolts al 50% en aigua destil·lada.

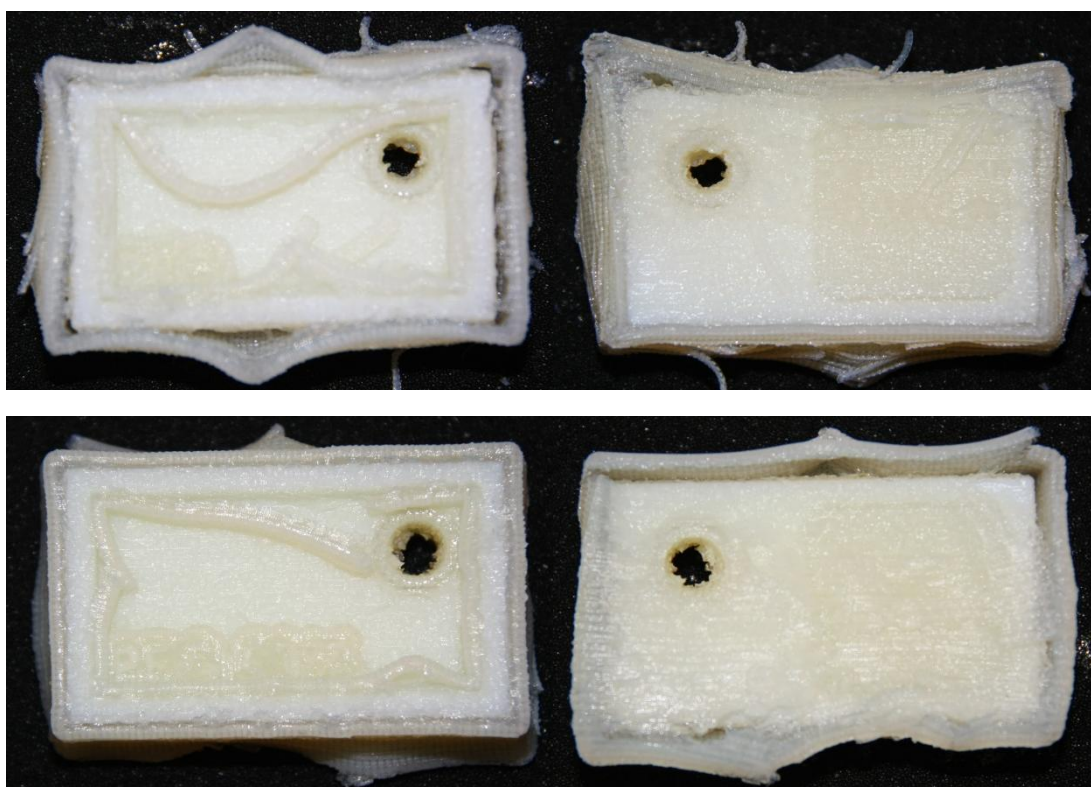
| SENSE TRACTAMENT | PEG | PEG 50% | Propi | Propi 50% |
|-------------------------|-------|---------|-------|-----------|
| Llargada [mm] | 53,14 | 53,24 | 53,39 | 53,27 |
| Amplada [mm] | 33,09 | 33,17 | 33,1 | 33,06 |
| Altura [mm] | 14,35 | 14,37 | 14,3 | 14,36 |
| Ø _{forat} [mm] | 7 | 6,91 | 7,01 | 6,99 |
| Rebava superior [mm] | 3,24 | 3,14 | 3,26 | 3,11 |
| Profunditat total [mm] | 11,85 | 11,8 | 11,53 | 11,7 |
| Pes [g] | 26,8 | 27 | 27,1 | 27,1 |

Taula 10. Mesures de les peces per a la experimentació amb alcohols abans de la realització del tractament. Font: elaboració pròpia.

| 3 HORES | PEG | PEG 50% | Propi | Propi 50% |
|-------------------------|-------|---------|-------|-----------|
| Llargada [mm] | 55,27 | 53,35 | 53,65 | 51,01 |
| Amplada [mm] | 34,63 | 33,77 | 33,83 | 31,04 |
| Altura [mm] | 15,26 | 15,94 | 15,12 | 16,18 |
| Ø _{forat} [mm] | 6,4 | 6,24 | 6,5 | 5,48 |
| Rebava superior [mm] | 4,67 | 3,4 | 3,61 | 3,28 |
| Profunditat total [mm] | 13,35 | 13,38 | 12,36 | 13,7 |
| Pes [g] | 31,2 | 32,1 | 32,6 | 29,9 |
| Comentaris | 1) | 2) | 1) | 3) |

Taula 11. Mesures de les peces al haver transcorregut tres hores des de l'inici de l'experimentació amb alcohols. Font: elaboració pròpia.

- 1) S'ha inflat molt però no es desprèn.
- 2) Bastant inflat Es comença a "obrir" per la part inferior.
- 3) Es desprèn en forma de lames.



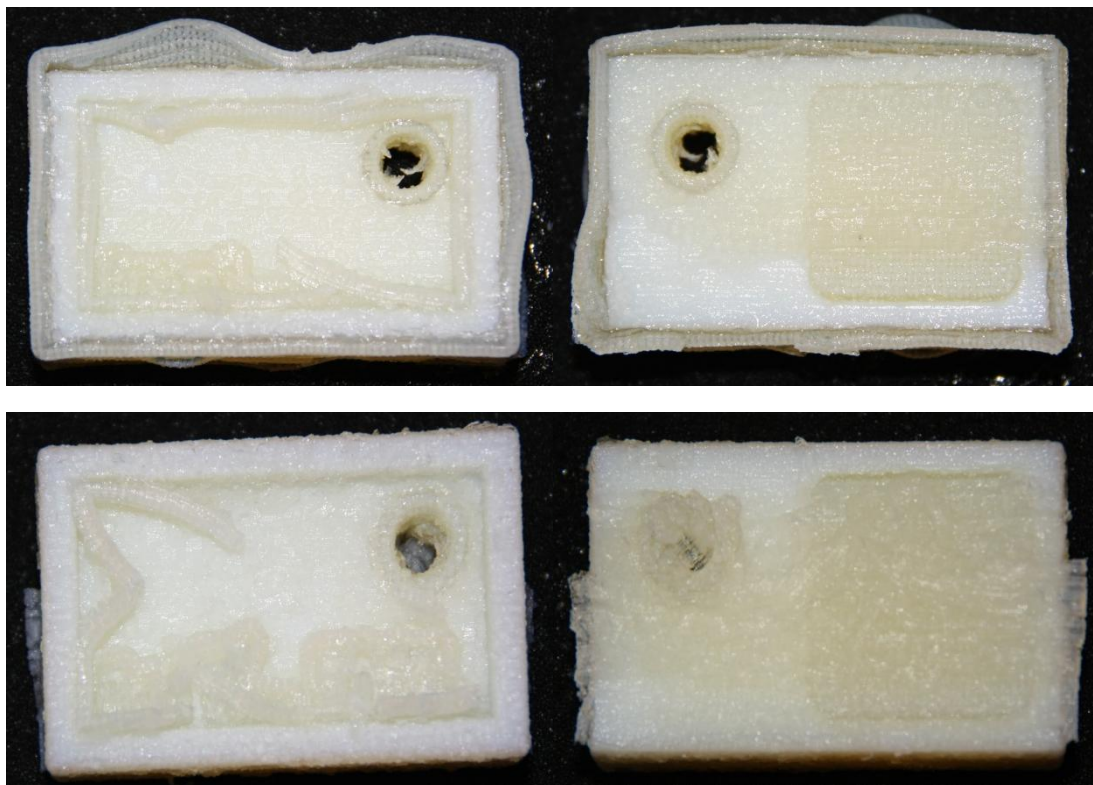


Figura 13. Perspectiva superior i inferior de les peces al haver transcorregut tres hores des de l'inici de l'experimentació. Tractaments (de dalt a baix): PEG, PEG al 50%, propilenglicol, propilenglicol al 50%. Font: elaboració pròpia.

| 48 HORES | PEG | PEG 50% | Propi | Propi 50% |
|-------------------|------|---------|-------|-----------|
| Pes [g] | 29,7 | 33,1 | 29,4 | 29,9 |
| Comentaris | 1) | 1) | 1) | 2) |

Taula 12. Dades extretes a la finalització de l'experiment amb hidròxid de potassi. Font: elaboració pròpia.

- 1) S'ha inflat el suport però no s'ha arribat a desprendre.
- 2) Quasi no ha estat afectat, queda tot el suport.

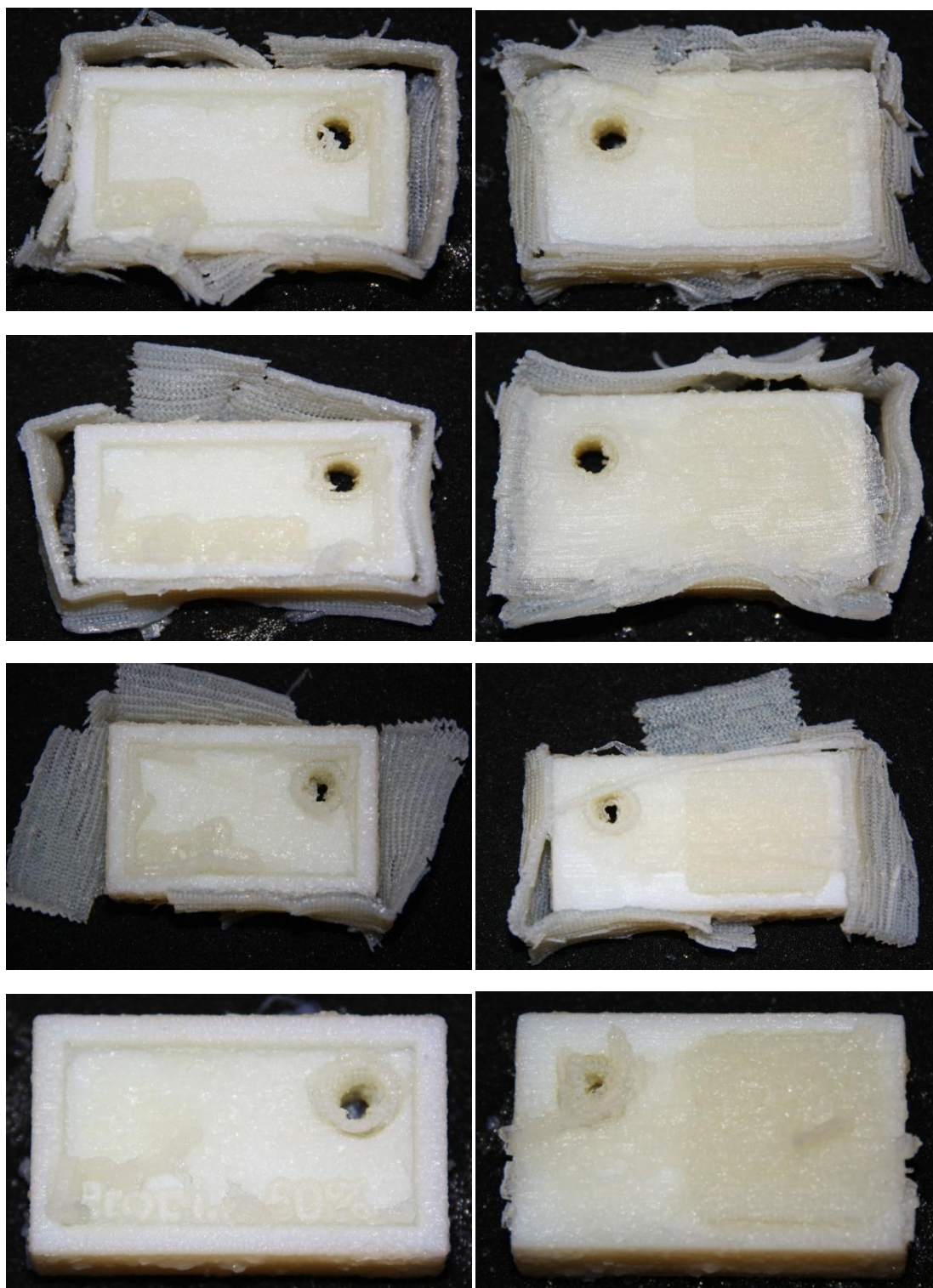


Figura 14. Perspectiva superior i inferior de les peces al haver transcorregut quaranta-vuit hores des de l'inici de l'experimentació. Tractaments (de dalt a baix): PEG, PEG al 50%, propilenglicol, propilenglicol al 50%. Font: elaboració pròpia.

Les conclusions que s'han pogut extreure d'aquesta experimentació han estat les següents:

- Aquests dos alcohols tenen un comportament bastant semblant al de l'hidròxid de sodi. El suport s'infla molt, més que en els experiments anteriors, però no arriba a desprendre's. Malgrat això, el que s'observa és que l'estructura de suport s'infla de manera bastant més homogènia en tot el seu volum que en els casos anteriors, on només s'inflava la capa superficial en contacte amb la mescla. L'alcohol permet una major penetració en l'estructura de suport, afectant a una major profunditat.

- Al haver passat un temps inicial de tres hores, l'estructura del suport no s'ha desprès en absolut i tant sols s'ha inflat. Al completar les quaranta-vuit hores totals, el suport s'ha inflat encara més i es comença a fracturar per alguns punts, però en general no s'ha desenganxat de la peça.

- Cap cas les peces ha estat afectada, fet diferenciador respecte l'alcohol etílic de 96º utilitzat en experimentacions anteriors. Ni el propilenglicol ni el polietilenglicol reaccionen químicament amb el material de construcció que forma la peça definitiva.

8.2.3. Optimització del tractament

A la vista dels resultats obtinguts en totes les experimentacions anteriors, i veient que per si sola cap de les opcions havia aconseguit l'objectiu desitjat, es decideix ajuntar dos factors per intentar millorar l'efectivitat del procés. Es va decidir combinar l'utilització d'alcohols, que permet una major penetració en l'estructura de suport, amb mescles d'hidròxid de sodi, que ajuda al estovament i despreniment d'aquesta estructura. Per a realitzar aquesta mescla inicialment s'intenta dissoldre l'hidròxid de sodi directament en els dos alcohols, però la seva solubilitat és molt limitada. Per aquest motiu, el que és decideix és realitzar mescles amb la següent estructura: 50% alcohol (polietilenglicol o propilenglicol) + 50% mescla de l'hidròxid de sodi dissolt en aigua. A més a més, i tenint en compte que el principal problema fins al moment és el fet de no desprendre's o desenganxar-se el suport de la peça definitiva, s'ha utilitzat l'aplicació d'ultrasons descrita anteriorment. Mitjançant la utilització d'ultrasons s'intenta aportar una energia extra al sistema, ajudant d'aquesta forma a que l'estructura de suport estovada es desprengui de la peça definitiva amb més facilitat. S'han realitzat mescles amb concentracions del 17,5% i del 22,5% de pes d'hidròxid de sodi en la mescla total. Aquest experiment difereix de tots els realitzats fins al moment pel que fa a la duració, doncs el període d'estudi serà tant sols de tres hores en lloc de quaranta-vuit degut a la impossibilitat de tenir durant tot aquest temps la màquina funcionant.

| SENSE TRACTAMENT | Ultrasons1 | Ultrasons2 | Ultrasons3 | Ultrasons4 |
|-------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Llargada [mm] | 53,21 | 53,24 | 53,18 | 53,21 |
| Amplada [mm] | 33,33 | 33,3 | 33,28 | 33,44 |
| Altura [mm] | 14,99 | 15,39 | 14,86 | 14,9 |
| Ø _{forat} [mm] | 6,75 | 6,89 | 6,84 | 6,76 |
| Rebava superior [mm] | 3,34 | 3,31 | 3,32 | 3,43 |
| Profunditat total [mm] | 11,59 | 11,73 | 11,78 | 11,77 |
| Pes [g] | 27 | 27 | 26,8 | 26,9 |

Taula 13. Mesures de les peces per a la experimentació amb ultrasons abans de la realització del tractament. Font: elaboració pròpia.

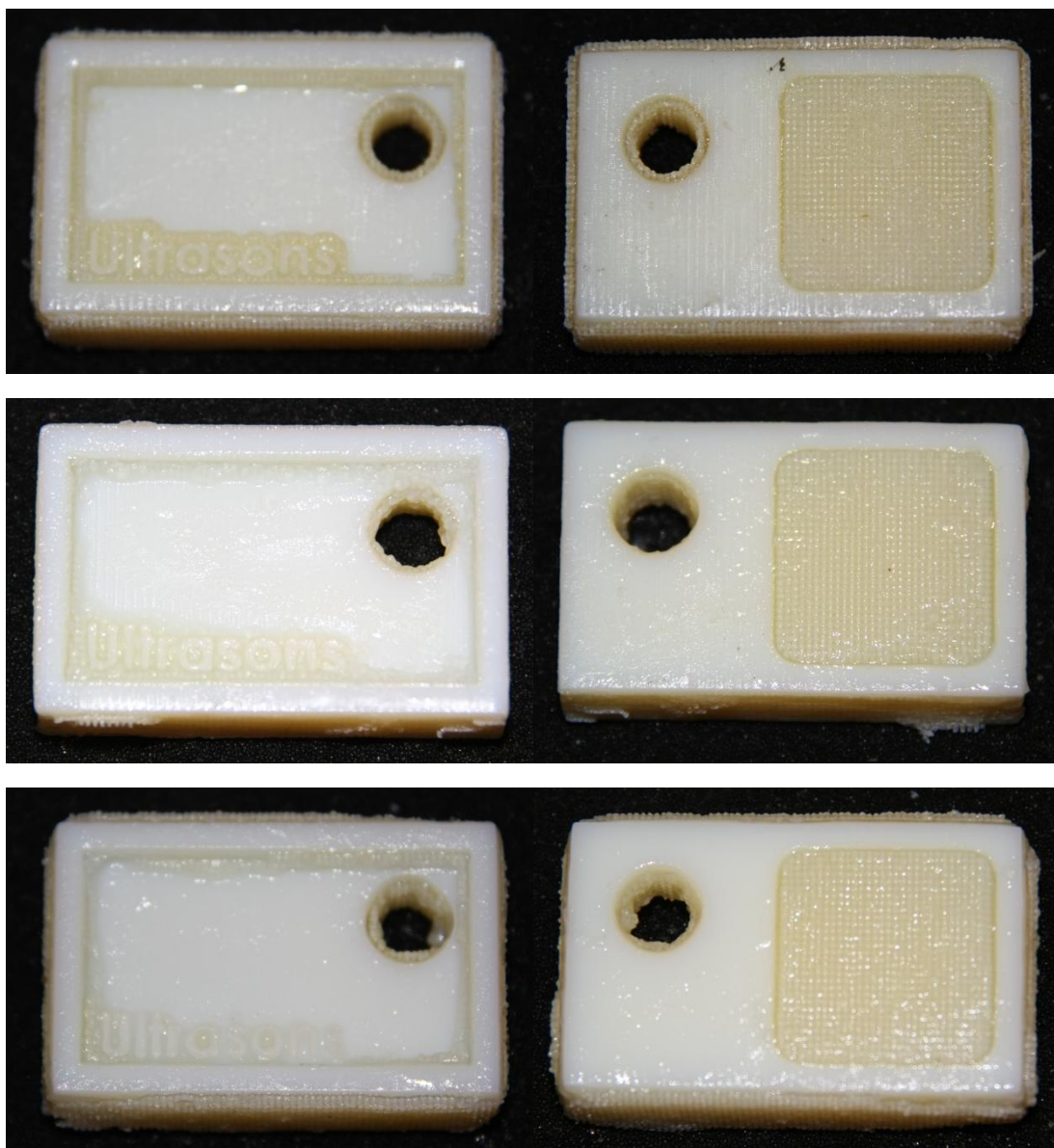
- Ultrasons1: 22,5% NaOH + 27,5% aigua + 50% PEG
- Ultrasons2: 22,5% NaOH + 27,5% aigua + 50% Propi
- Ultrasons3: 17,5% NaOH + 32,5% aigua + 50% PEG
- Ultrasons4: 17,5% NaOH + 32,5% aigua + 50% Propi

| 3 HORES | Ultrasons1 | Ultrasons2 | Ultrasons3 | Ultrasons4 |
|-------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Llargada [mm] | 52,22 | 50,94 | 52,42 | 50,31 |
| Amplada [mm] | 33,02 | 30,93 | 32,75 | 30,71 |
| Altura [mm] | 13,46 | 13,22 | 13,05 | 13,32 |
| Ø _{forat} [mm] | 7,58 | 9,47 | 8,4 | 9,36 |
| Rebava superior [mm] | 3,02 | 3,16 | 3,28 | 3,13 |
| Profunditat total [mm] | 10,39 | 10,58 | 10,07 | 10,44 |
| Pes [g] | 22,4 | 20,1 | 21,1 | 20 |
| Comentaris: | 1) | 2) | 3) | 4) |

Taula 14. Mesures de les peces al haver transcorregut tres hores des de l'inici de l'experimentació amb ultrasons. Font: elaboració pròpia.

- 1) Peça no afectada. Queda suport als laterals i als forats

- 2) Peça definitiva afectada. Suport bastant desfet i enganxós. Encara queda suport per retirar.
- 3) Peça no afectada. Queda suport per netejar, especialment als laterals i als forats. Millor resultat que amb concentració més elevada.
- 4) Peça definitiva afectada. Peça bastant neta. Suport molt desfet i tou, excepte al forat inferior.



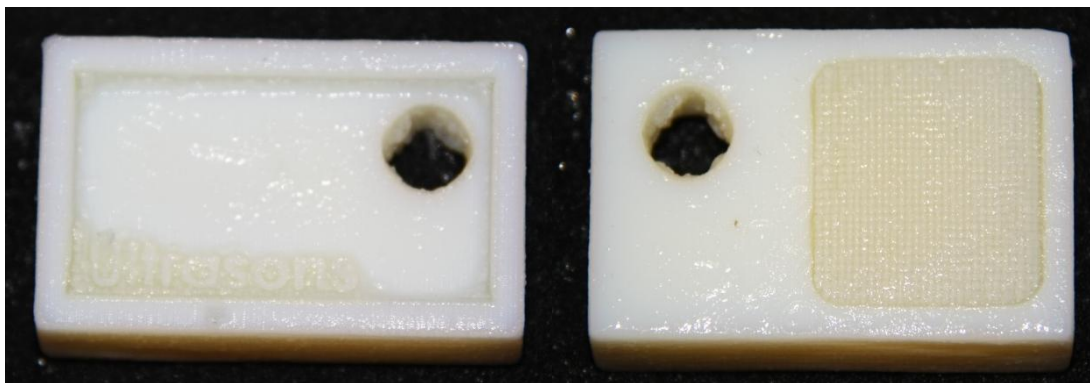


Figura 15. Perspectiva superior i inferior de les peces al haver transcorregut tres hores des de l'inici de l'experimentació. Tractaments (de dalt a baix): Ultrasons1, Ultrasons2, Ultrasons3 i Ultrasons4. Font: elaboració pròpia.

Les conclusions que s'han pogut extreure de l'experimentació amb el bany d'ultrasons han estat les següents:

- A diferència que en les experimentacions anteriors, s'obtenen millors resultats pel que fa a la desaparició del material suport amb les concentracions baixes, tant en les mescles de polietilenglicol com en les de propilenglicol.
- En cap dels dos casos la peça ha estat netejada completament en les tres hores en que han estat dins del bany d'ultrasons.
- L'actuació dels dos alcohols és diferent: quan es tracta d'una mescla amb polietilenglicol, l'estructura de suport s'infla i es desprèn amb un comportament similar al obtingut en les experimentacions amb hidròxid de sodi sol, estovant-lo també en part. Pel que fa a les mescles amb propilenglicol, el suport es comença a desfer, formant una espècie de pasta o gelatina tova i molt viscosa.
- Tant en la concentració elevada (22,5%) com en la més baixa (17,5%) el propilenglicol resulta millor opció, doncs elimina més estructura de suport en igualtat de condicions. A més a més, al finalitzar les tres hores d'experimentació el material de suport contingut a l'interior del forat ha estat més estovat en el cas del propilenglicol que en el del polietilenglicol.
- En el cas del polietilenglicol la peça definitiva no ha estat afectada. Pel que fa al propilenglicol sembla que la capa més superficial s'ha estovat lleugerament amb un comportament similar al del suport, quedant uniforme i sense el relleu característic propi de la impressió a les capes superiors.

Per poder comprovar el comportament a llarg termini s'ha optat per realitzar una experimentació paral·lela i de característiques semblants però sense la utilització d'ultrasons, permetent així una duració total de quaranta-vuit hores. Per aquesta experimentació s'ha decidit utilitzar concentracions del 15, 20 i 25% de pes d'hidròxid de sodi en la mescla final, i s'han utilitzat tant el propilenglicol com el polietilenglicol.

| SENSE TRACTAMENT | PEG 15 | PEG 20 | PEG 25 | Propi 15 | Propi 20 | Propi 25 |
|-------------------------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|
| Llargada [mm] | 53,13 | 53,05 | 53,08 | 53,1 | 53,09 | 53,11 |
| Amplada [mm] | 33,19 | 33,18 | 33,19 | 33,24 | 33,23 | 33,35 |
| Altura [mm] | 14,86 | 14,6 | 14,53 | 14,53 | 14,74 | 14,43 |
| Ø _{forat} [mm] | 6,82 | 6,84 | 6,94 | 6,86 | 6,82 | 6,85 |
| Rebava superior [mm] | 3,09 | 3,61 | 3,46 | 3,62 | 3,38 | 3,29 |
| Profunditat total [mm] | 12,22 | 11,73 | 11,89 | 11,74 | 11,66 | 11,9 |
| Pes [g] | 26,8 | 27,2 | 26,9 | 27,1 | 27 | 27,2 |

Taula 15. Mesures de les peces per a la experimentació amb alcohols i NaOH abans de la realització del tractament. Font: elaboració pròpia.

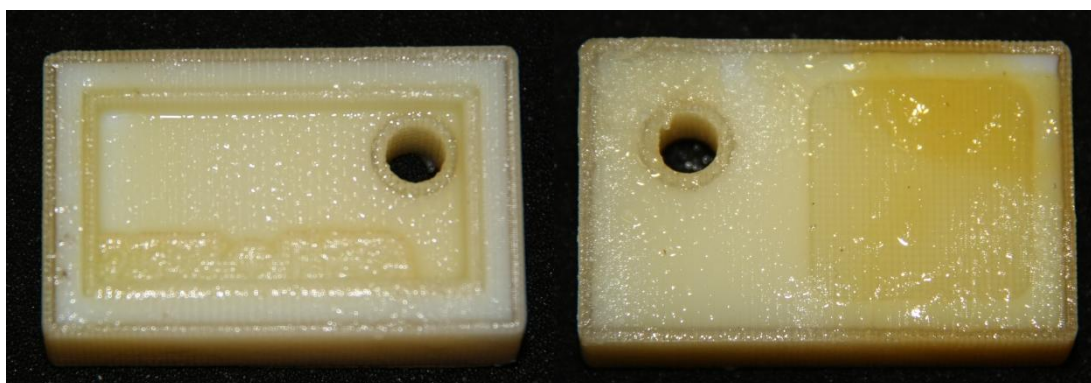
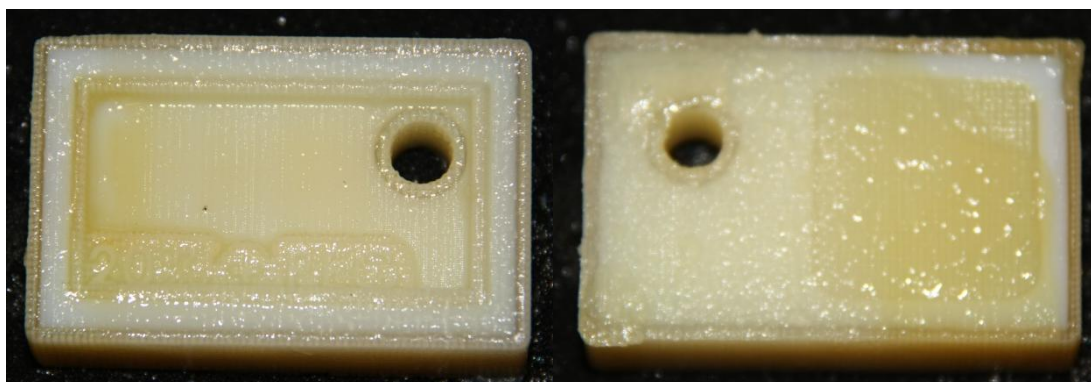
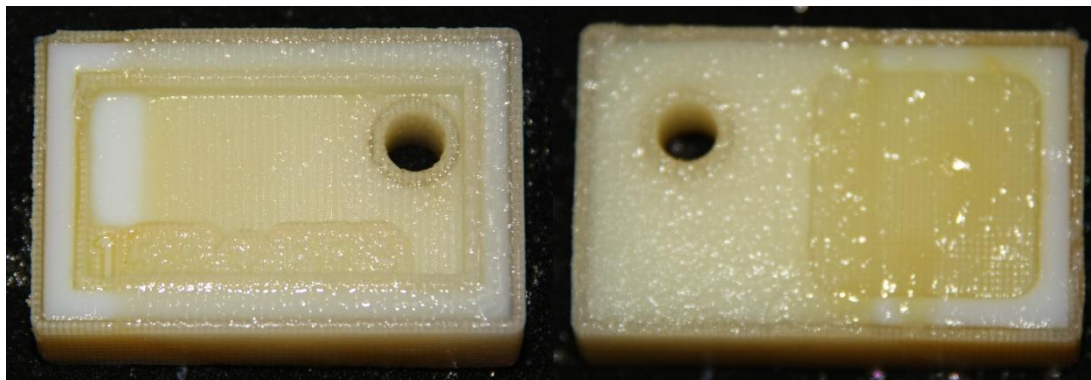
| 3 HORES | PEG 15 | PEG 20 | PEG 25 | Propi 15 | Propi 20 | Propi 25 |
|-------------------------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|
| Llargada [mm] | 53,17 | 53,15 | 53,03 | 52,91 | 53,12 | 53,18 |
| Amplada [mm] | 33,3 | 33,3 | 33,25 | 33 | 33,15 | 33,14 |
| Altura [mm] | 14,87 | 15,32 | 14,72 | 13,53 | 13,97 | 13,8 |
| Ø _{forat} [mm] | 6,85 | 6,2 | 6,65 | 7,57 | 7,39 | 7,57 |
| Rebava superior [mm] | 3,3 | 3,91 | 3,11 | 3,32 | 3,25 | 3,3 |
| Profunditat total [mm] | 11,96 | 12,08 | 12,14 | 10,59 | 11,1 | 11,74 |
| Pes [g] | 26,3 | 27,2 | 27,8 | 24,3 | 24,9 | 26 |
| Comentaris | 1) | 2) | 2) | 3) | 4) | 4) |

Taula 16. Mesures de les peces al haver transcorregut tres hores des de l'inici de l'experimentació amb alcohols i NaOH. Font: elaboració pròpia.

- 1) Suport tou i inflat, més acció del NaOH que de l'alcohol. Es comença a netejar part de la peça. Més efectiu que en concentracions superiors.
- 2) Suport tou i inflat, més acció del NaOH que de l'alcohol.

3) Suport molt tou i desfet, molt viscos. Millors resultats que el PEG: més peça neta. Més efectiu que amb concentracions majors.

4) Suport molt tou i desfet, molt viscos. Millors resultats que el PEG: més peça neta.



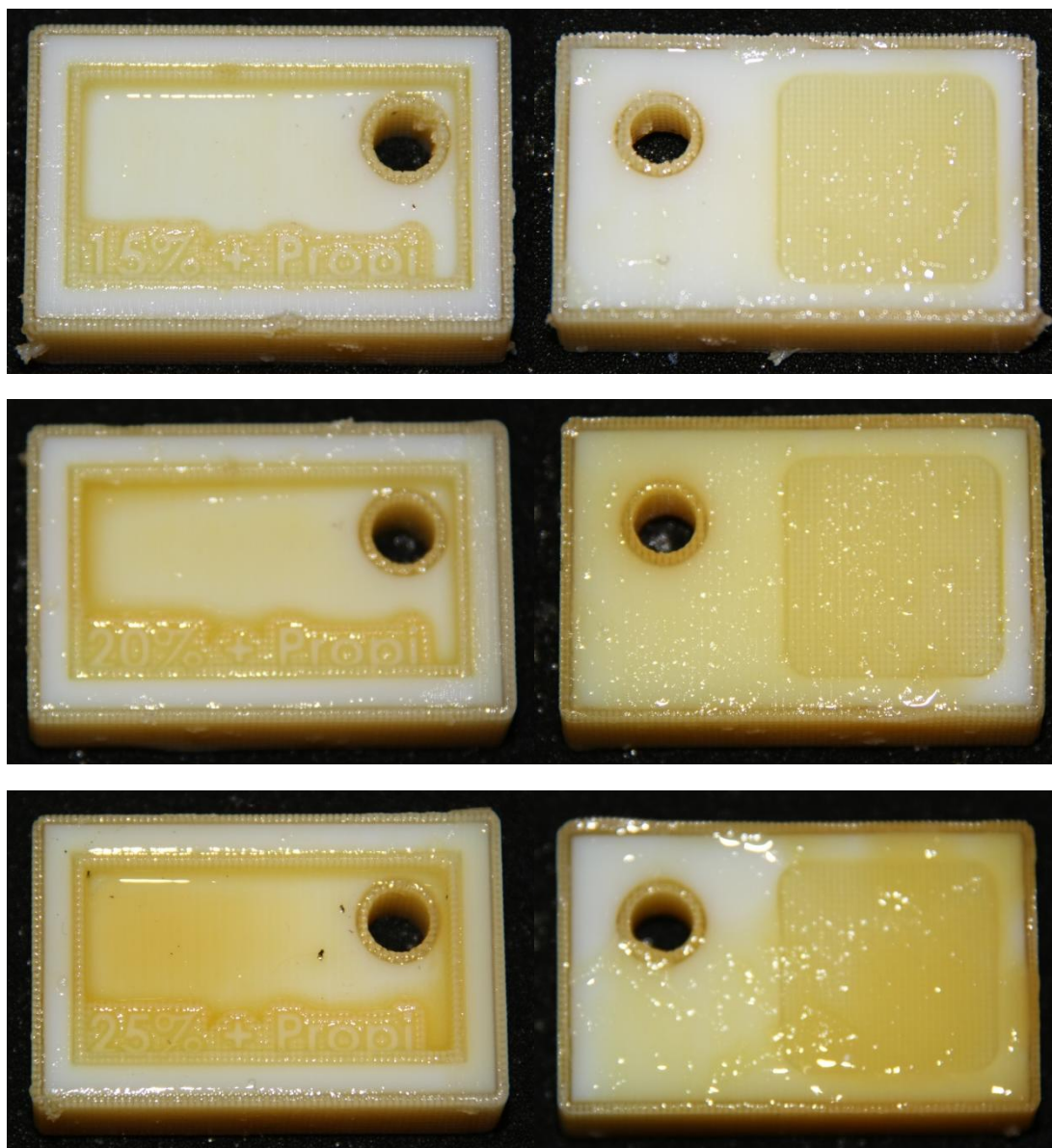
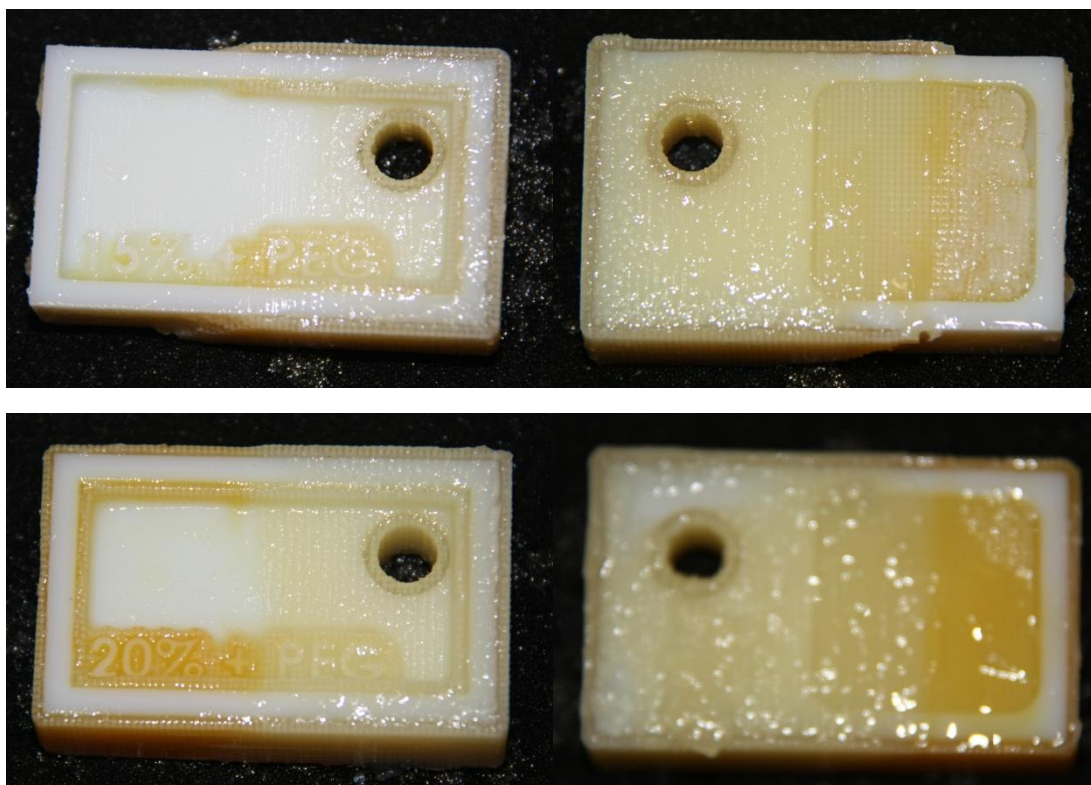


Figura 16. Perspectiva superior i inferior de les peces al haver transcorregut tres hores des de l'inici de l'experimentació. Tractaments (de dalt a baix): PEG al 15%, 20 i 25%; propilenglicol al 15%, 20% i 25%. Font: elaboració pròpia.

| 48 HORES | PEG 15 | PEG 20 | PEG 25 | Propi 15 | Propi 20 | Propi 25 |
|------------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|
| Pes [g] | 22,1 | 26,3 | 26,5 | 20,6 | 22,4 | 23,4 |
| Comentaris | 1) | 2) | 2) | 3) | 4) | 4) |

Taula 17. Dades extretes a la finalització de l'experiment amb alcohols i NaOH. Font: elaboració pròpia.

- 1) Peça no afectada. Mescla pràcticament en estat sòlid. S'han creat dues fases dins la mescla. La part de la peça submergida a la fase inferior està més neta i el suport està molt tou, salta al contacte amb aigua. Millor efectivitat que amb concentracions majors.
- 2) Peça no afectada. Mescla pràcticament en estat sòlid. S'han creat dues fases dins la mescla. La part de la peça submergida a la fase inferior està més neta i el suport està molt tou i enganxós, salta al contacte amb aigua.
- 3) Peça afectada. Mescla en estat gelatinós, amb una base completament sòlida a la part inferior i una fina capa a la superfície també sòlida. Suport bastant tou. Més efectiu que amb concentracions majors.
- 4) Peça afectada. Mescla en estat gelatinós, amb una base completament sòlida a la part inferior i una fina capa a la superfície també sòlida. Primera capa del suport bastant viscosa però bastant dur a sota.



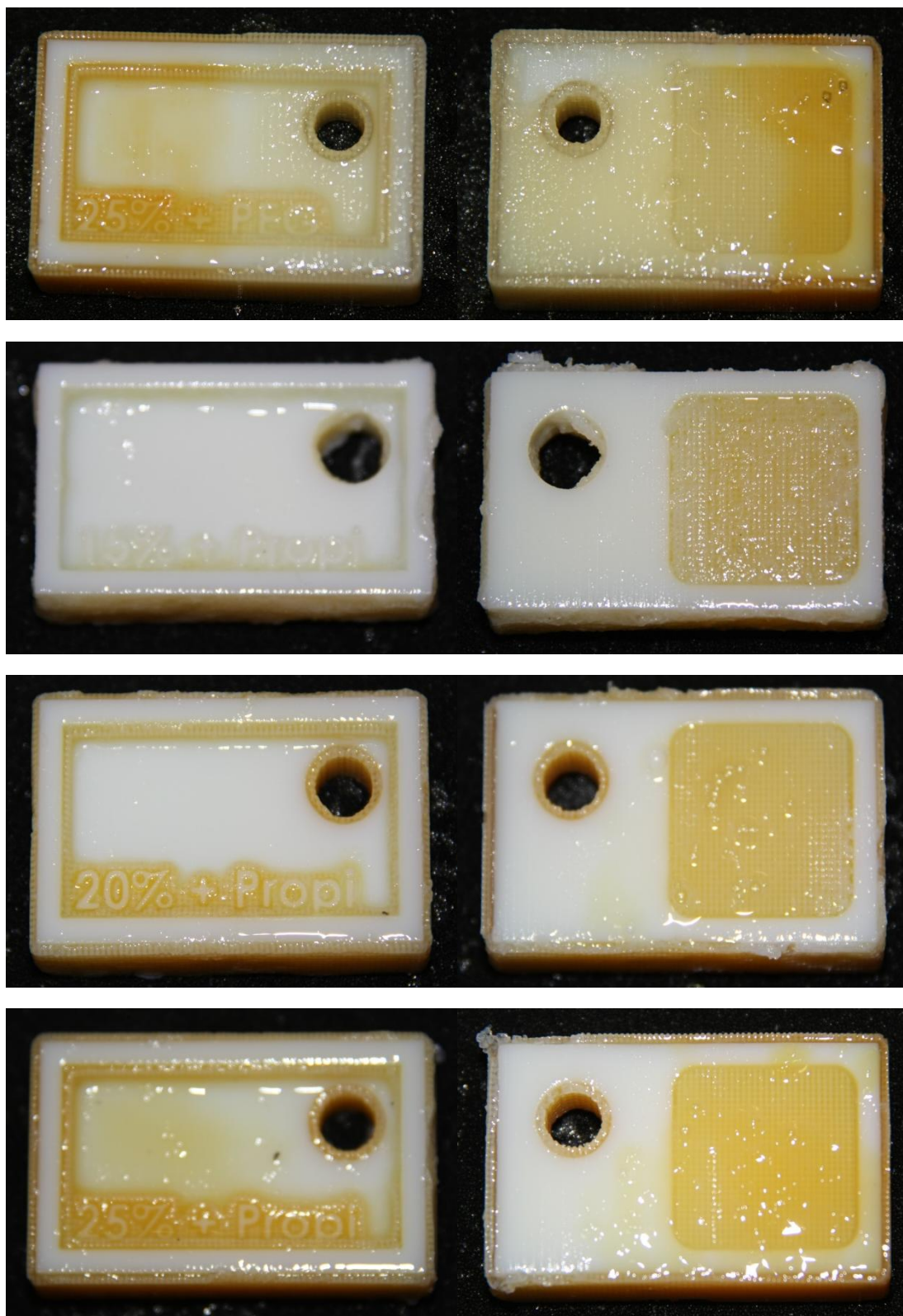


Figura 17. Perspectiva superior i inferior de les peces al haver transcorregut quaranta-vuit hores des de l'inici de l'experimentació. Tractaments (de dalt a baix): PEG al 15%, 20 i 25%; propilenglicol al 15%, 20% i 25%. Font: elaboració pròpia.

Les conclusions que s'han pogut extreure són les següents:

- D'igual manera que en el cas anterior, al barrejar alcohols amb hidròxid de sodi major concentració no implica més efectivitat. Amb els dos alcohols s'ha netejat millor la peça quan la concentració era del 15% (la menor), tant a les tres hores com quan n'han transcorregut quaranta-vuit.

- També de la mateixa forma que ha succeït en el bany d'ultrasons, a les tres hores el propilenglicol a obtingut millors resultats que el polietilenglicol, netejant millor les peces i desprenent major part del suport. El pes en tots els casos en inferior que en el cas del polietilenglicol, així com la majoria de les dimensions.

- A les tres hores no hi ha mostres de que cap de les dues mescles hagi afectat al material de construcció de la peça definitiva.

- Al realitzar l'anàlisi al cap de quaranta-vuit hores les mescles que s'han realitzat amb polietilenglicol apareixen pràcticament en estat sòlid, amb dues fases perfectament diferenciades dins la mescla. Les parts de la peça que estan en contacte amb la fase inferior de la mescla estan bastant netes, i el suport que queda està completament estovat, al passar-hi aigua sense pressió per netejar la superfície es desenganxa. També en aquest cas la peça que apareix més neta és la de la concentració del 15%, la més baixa.

- Les mescles que s'han realitzat amb propilenglicol apareixen en estat gelatinós, amb una capa sòlida de material a la part inferior i una fina capa a la part superior també en estat sòlid. Les peces tenen en conjunt menys material suport que en el cas del polietilenglicol, tot i que la part neta d'aquestes (en contacte amb la fase inferior de la mescla) està millor que en les peces amb propilenglicol.

- Les peces que han estat tractades amb mescles de polietilenglicol no han estat afectades. Pel contrari, les peces que han estat tractades amb propilenglicol sí que ho han quedat afectades, ja que aquest a començat a reaccionar amb les capes més superficials de la peça i ha fet desaparèixer completament tant el seu relleu com la seva duresa, quedant molt toves i amb un consistència viscosa que es desfà al tocar-ho.



Figura 18. Imatges de la doble fase formada en la mescla amb PEG (esquerra i centre) i de la capa sòlida al fons de la mescla de propilenglicol (dreta). Font: elaboració pròpia.

Per intentar solucionar aquest problema i tenint en compte el referent al comportament de les diferents concentracions de NaOH en presència del polietilenglicol, s'han realitzat tres mescles més amb la mateixa estructura que en l'experimentació anterior, amb concentracions al 10, 15 i 20% de pes d'hidròxid de sodi en la mescla total, i s'han introduït al bany d'ultrasons. En aquesta nova experimentació es realitzarà un filtratge de la mescla cada seixanta minuts, per intentar evitar la creació d'aquestes dues fases amb diferents propietats, i per intentar també anar eliminant progressivament tot el material de suport que s'ha anat desenganxant de la peça i que per tant la mescla no satura. La duració total ha estat de tres hores.

| SENSE TRACTAMENT | Filtrat 10 | Filtrat 15 | Filtrat 20 |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Llargada [mm] | 52,96 | 52,92 | 53,15 |
| Amplada [mm] | 34,47 | 34,77 | 35,31 |
| Altura [mm] | 13,6 | 14,27 | 14,17 |
| Ø_{forat} [mm] | 7,02 | 6,9 | 7,02 |
| Rebava superior [mm] | 2,92 | 3,04 | 2,95 |
| Profunditat total [mm] | 11,5 | 11,52 | 11,35 |
| Pes [g] | 27 | 27 | 26,7 |

Taula 18. Mesures de les peces per a la experimentació amb alcohols i NaOH amb filtratge i ultrasons abans de la realització del tractament. Font: elaboració pròpia.

| 3 HORES | Filtrat 10 | Filtrat 15 | Filtrat 20 |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Llargada [mm] | 50,16 | 50,05 | 52,87 |
| Amplada [mm] | 30,02 | 30,95 | 32,51 |
| Altura [mm] | 13,16 | 13,25 | 13,19 |
| Ø_{forat} [mm] | 10,16 | 10,2 | 8,02 |
| Rebava superior [mm] | 3,15 | 3,12 | 3,15 |
| Profunditat total [mm] | 9,76 | 9,89 | 8,94 |
| Pes [g] | 18,3 | 18,9 | 22,1 |
| Comentaris | 1) | 1) | 2) |

Taula 19. Mesures de les peces al haver transcorregut tres hores des de l'inici de l'experimentació amb alcohols i NaOH amb filtratge i ultrasons. Font: elaboració pròpia.

1) Peça bastant neta. Només queda suport al forat inferior, i està bastant desfet. Abans de realitzar el filtratge de la mescla segueix estan present la doble fase.

2) Peça quasi inafectada, té molt suport per totes les superfícies tot i que està molt desfet. Abans de realitzar el filtratge de la mescla segueix estan present la doble fase.

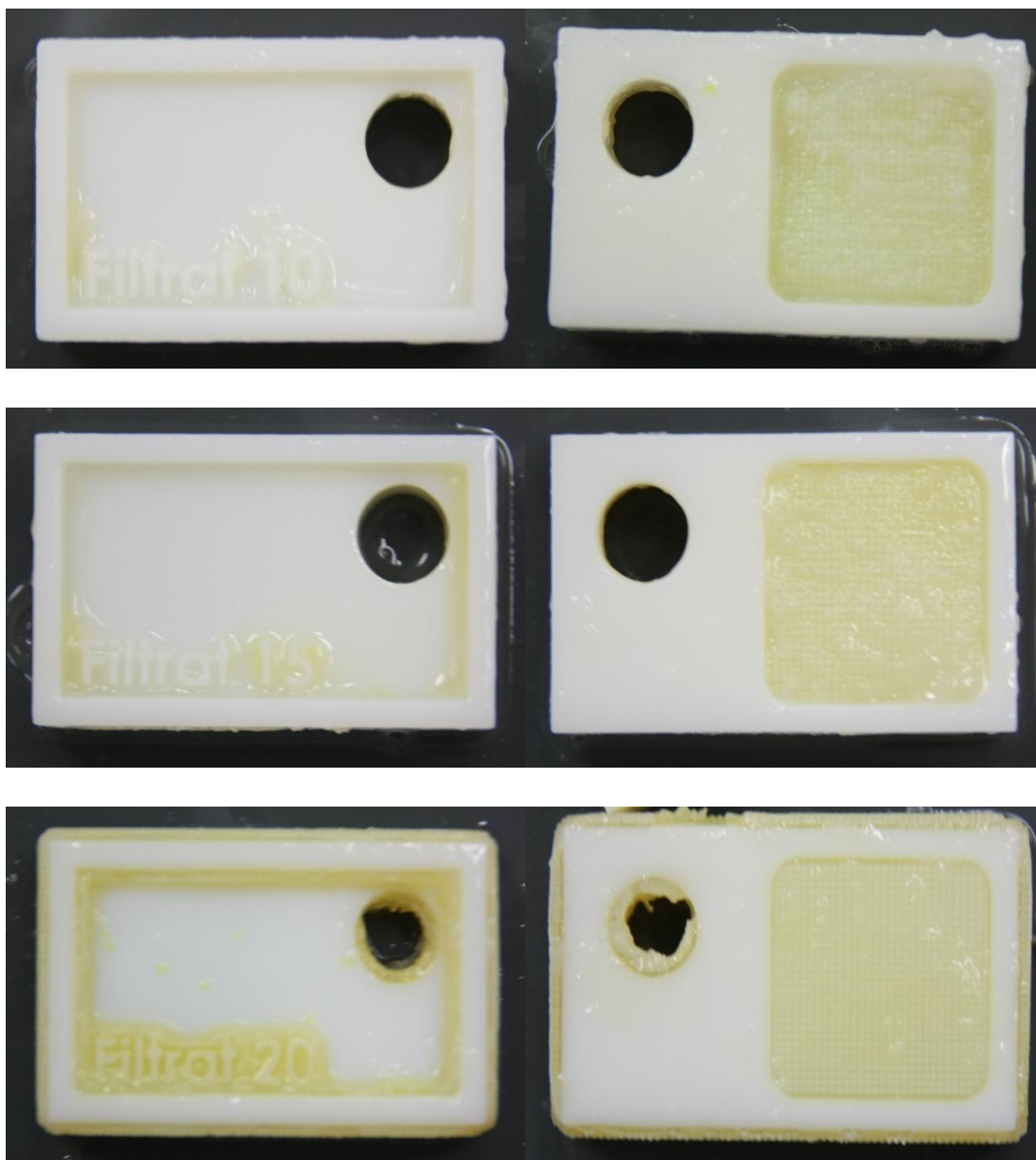


Figura 19. Perspectiva superior i inferior de les peces al haver transcorregut tres hores des de l'inici de l'experimentació. Tractaments (de dalt a baix): PEG al 10, 15 i 20% amb filtratge i ultrasons. Font: elaboració pròpia.

Les conclusions que s'han pogut extreure d'aquesta experimentació han estat les següents:

- Respecte a l'experimentació realitzada anteriorment amb característiques similars Ultrasons1 i Ultrasons3 (veure Taula 14), les peces apareixen molt més netes i segueixen sense estar afectades. El pes és inferior, així com les dimensions de la peça un cop finalitzat el tractament.

- Un altre cop es torna a complir el mateix resultat pel que fa a les concentracions: en aquest cas quasi no hi ha diferència entre la peça al 10 i al 15%, però la mescla realitzada al 20% quasi no ha aconseguit desprendre el suport malgrat haver estat tres hores dins el bany d'ultrasons.

- Tot i el filtratge i la utilització d'ultrasons, encara es segueix produint separació de la mescla en dues fases amb característiques molt diferents. Aquest fet no es pot observar a les imatges perquè durant els processos de filtratge s'han anat movent dins la mescla, estant en contacte amb les dues fases de la mescla per igual.

- Amb tot, aquest procés no és encara suficient com per a netejar les peces, ja que malgrat desprendre el suport i estovar-lo en gran mesura a les tres hores encara queda massa suport al forat inferior.

Paral·lelament també s'han realitzat proves amb mescles formades únicament per hidròxid de sodi i aigua, ja que inicialment s'havien obtingut bons resultats amb aquestes mescles, i s'han introduït al bany d'ultrasons amb el mateix objectiu que en l'experimentació anterior: aportar una energia extra que ajudi a que l'estructura de suport es separi de la peça definitiva. Les mescles emprades han estat amb concentracions d'un 15, 20 i 25% de pes d'hidròxid de sodi en la mescla total, doncs són les concentracions amb que s'han obtingut millors resultats en les experimentacions anteriors amb aquestes característiques (veure Taula 3). Un cop realitzades les mescles aquestes s'han introduït al bany d'ultrasons, amb una duració total de tres hores.

| SENSE TRACTAMENT | Ultra+NaOH15 | Ultra+NaOH20 | Ultra+NaOH25 |
|-------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Llargada [mm] | 53,09 | 53,06 | 52,96 |
| Amplada [mm] | 35,46 | 33,88 | 35,47 |
| Altura [mm] | 14,31 | 14,02 | 14,23 |
| Ø _{forat} [mm] | 7,11 | 6,98 | 6,96 |
| Rebava superior [mm] | 3,21 | 2,98 | 3,06 |
| Profunditat total [mm] | 11,73 | 11,43 | 11,5 |
| Pes [g] | 26,8 | 27,1 | 27 |

Taula 20. Mesures de les peces per a la experimentació amb NaOH i ultrasons abans de la realització del tractament. Font: elaboració pròpia.

| 3 HORES | Ultra+NaOH15 | Ultra+NaOH20 | Ultra+NaOH25 |
|-------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Llargada [mm] | 50,17 | 50,12 | 50,37 |
| Amplada [mm] | 30,08 | 30,27 | 30,6 |
| Altura [mm] | 13,2 | 13,19 | 13,22 |
| Ø _{forat} [mm] | 10,06 | 10,2 | 10,39 |
| Rebava superior [mm] | 3,19 | 3,15 | 3,54 |
| Profunditat total [mm] | 10,81 | 10,87 | 10,6 |
| Pes [g] | 17,7 | 18,2 | 19,2 |
| Comentaris | 1) | 2) | 3) |

Taula 21. Mesures de les peces al haver transcorregut tres hores des de l'inici de l'experimentació amb NaOH, filtratge i ultrasons. Font: elaboració pròpia.

- 1) Peça no afectada i molt neta. Suport molt desfet formant una espècie de gelatina que s'enganxa a la peça. El que queda està molt tou i es desfà sol. Només queda al forat inferior i molt poc al forat passant.
- 2) Peça no afectada i bastant neta. Suport molt desfet formant una espècie de gelatina. Forat passant net, forat inferior amb suport però molt estovat i desfet.
- 3) Peça no afectada però amb bastant suport encara. Suport bastant desfet i estovat, però a l'interior del forat sota la primera capa estovada el suport està sense afectar.

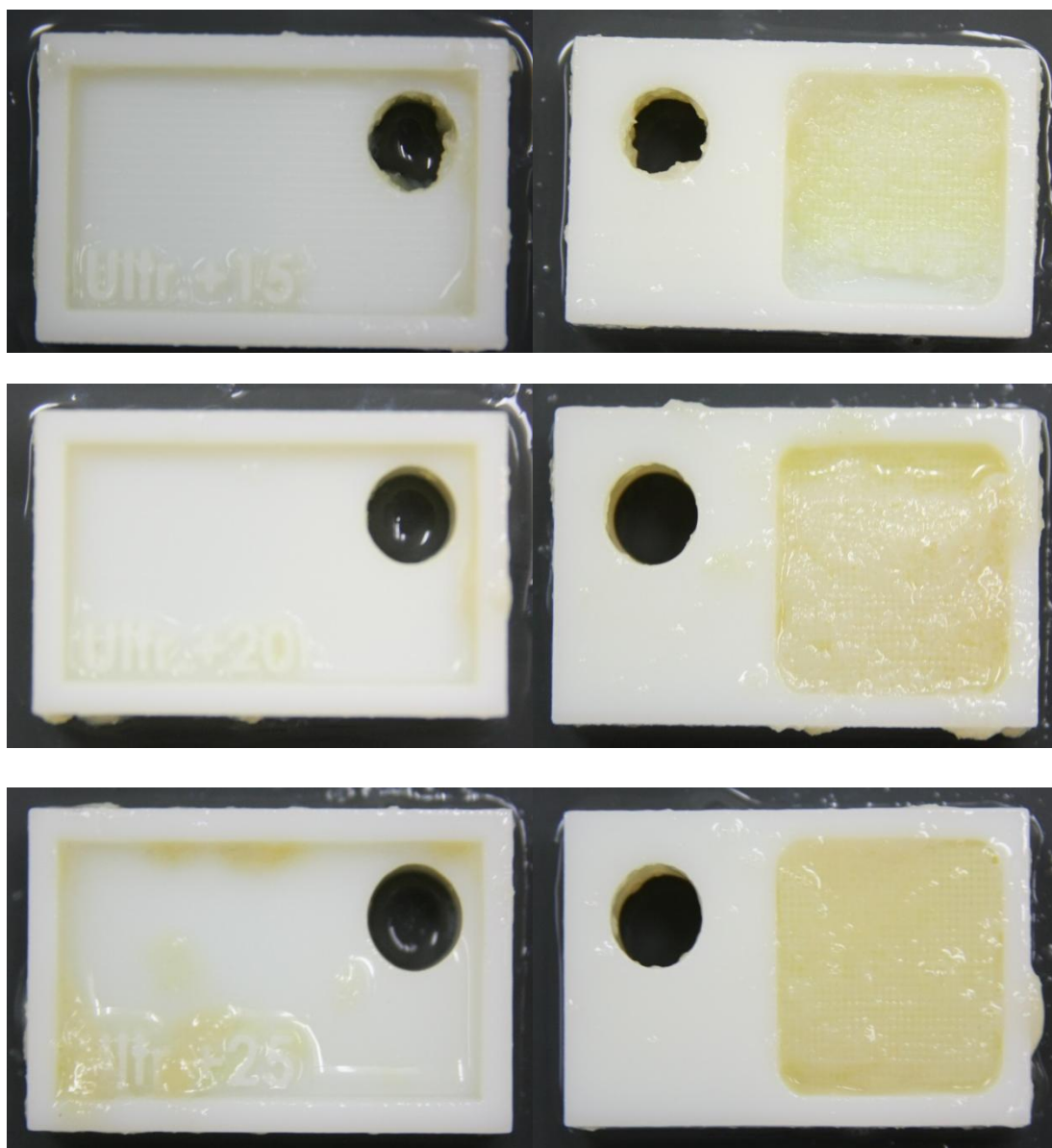


Figura 20. Perspectiva superior i inferior de les peces al haver transcorregut tres hores des de l'inici de l'experimentació. Tractaments (de dalt a baix): NaOH al 15, 20 i 25% amb ultrasons. Font: elaboració pròpia.

Les conclusions que s'han pogut extreure d'aquesta experimentació han estat les següents:

- Les peces no han estat afectades, i exceptuant la de màxima concentració estan bastant netes.

- A diferència de les primeres experimentacions amb hidròxid de sodi sol, al afegir-hi el factor dels ultrasons una major concentració no implica majors resultats (veure Taula 3). En aquest cas la concentració que dona millors resultats és la del 15%.

- Malgrat els bons resultats obtinguts, l'efecte de l'hidròxid de sodi és veu molt restringit a les capes més superficials. Si l'estructura de suport de la peça fos més gruixuda, aquest tipus de tractament que no inclou l'alcohol seria massa lent ja que per arribar a les capes més interiors primer ha d'estovar i desprendre completament les exteriors.

Finalment, amb els resultats obtinguts de les dues últimes experimentacions es decideix disminuir la proporció de polietilenglicol en la mescla fins a un 25%. Amb això s'intenta reduir la formació de les dues fases diferenciades i es dona més concentració a la barreja de l'hidròxid de sodi amb aigua dins la mescla total, ja que és el que obté millors resultats. Tot i això es decideix mantenir una part d'alcohol per intentar evitar el problema d'afectació únicament superficial que presenten els tractaments sense aquest component. Per a realitzar aquesta experimentació es preparen tres noves mescles amb un 25% de polietilenglicol i un 75% de dissolució d'hidròxid de sodi en aigua, amb concentracions d'un 10, 15 i 20% sobre la mescla total, ja que són les que han obtingut millors resultats en les dues experimentacions anteriors. A més s'ha tornat a recórrer al filtratge, tot i que aquest cop cada 30 minuts.

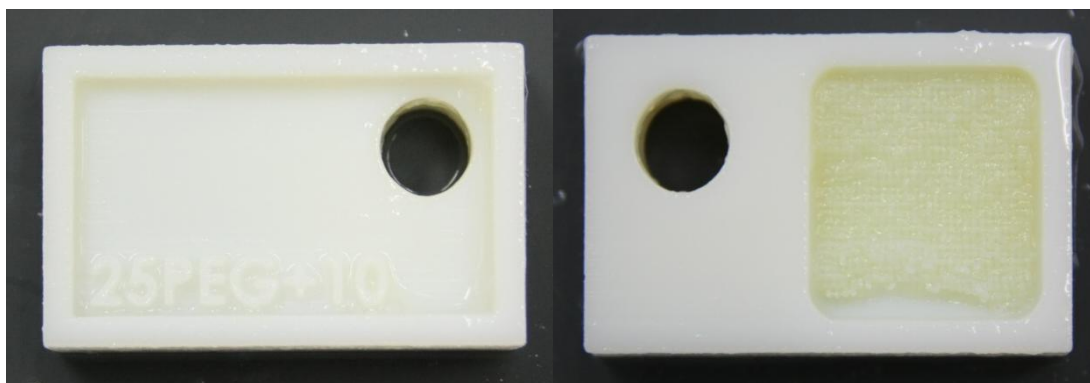
| SENSE TRACTAMENT | 25PEG 10 | 25PEG 15 | 25PEG 20 |
|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Llargada [mm] | 53,1 | 53,19 | 53,06 |
| Amplada [mm] | 32,98 | 33,02 | 32,96 |
| Altura [mm] | 14,57 | 14,22 | 14,38 |
| Ø_{forat} [mm] | 6,85 | 6,8 | 6,89 |
| Rebava superior [mm] | 3,13 | 3,3 | 3,03 |
| Profunditat total [mm] | 11,84 | 11,71 | 11,67 |
| Pes [g] | 26,6 | 26,4 | 26,5 |

Taula 22. Mesures de les peces per a la experimentació amb polietilenglicol (25%),NaOH i ultrasons abans de la realització del tractament. Font: elaboració pròpia.

| 3 HORES | 25PEG 10 | 25PEG 15 | 25PEG 20 |
|-------------------------|----------|----------|----------|
| Llargada [mm] | 50,17 | 50,1 | 50,01 |
| Amplada [mm] | 30,12 | 30,22 | 13,54 |
| Altura [mm] | 13,04 | 13,12 | 13,05 |
| Ø _{forat} [mm] | 9,93 | 9,78 | 9,65 |
| Rebava superior [mm] | 3,1 | 3,02 | 3,23 |
| Profunditat total [mm] | 11,45 | 11 | 11,13 |
| Pes [g] | 17,7 | 16,9 | 18,7 |
| Comentaris | 1) | 2) | 3) |

Taula 23. Mesures de les peces al haver transcorregut tres hores des de l'inici de l'experimentació amb polietilenglicol (25%), NaOH i ultrasons. Font: elaboració pròpia.

- 1) Peça no afectada i bastant neta. Només queda suport al forat inferior, tot i que bastant tou i en queda poc. Al punt de mínima afectació té una profunditat respecte la superfície plana de la peça de 0,7 mil·límetres.
- 2) Peça no afectada i molt neta. Només queda suport al forat interior, tot i que bastant tou i en queda molt poc. Al punt de mínima afectació té una profunditat respecte la superfície plana de la peça de 1,8 mil·límetres.
- 3) Peça no afectada i bastant neta, tot i que en menor mesura que les altres. Només queda suport al forat inferior, però en cap punt s'ha després completament. El suport restant està molt estovat, inclús en capes més internes.



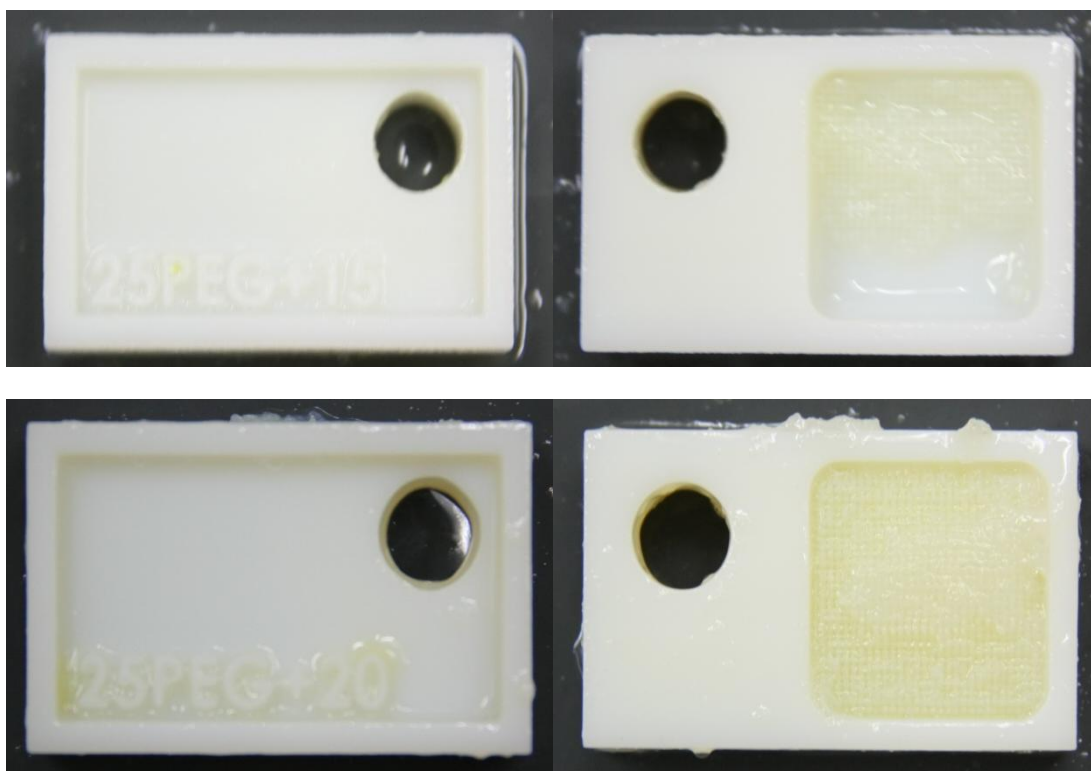


Figura 21. Perspectiva superior i inferior de les peces al haver transcorregut tres hores des de l'inici de l'experimentació. Tractaments (de dalt a baix): Polietilenglicol (25%), NaOH al 10, 15 i 20% amb ultrasons i filtratge. Font: elaboració pròpia.

- Al reduir la concentració d'alcohol i realitzar filtracions cada 30 minuts s'aconsegueix que el suport es desprengui en major mesura que en totes les experimentacions anteriors. Malgrat això, abans de realitzar la filtració segueix existint una diferència de fases dins de la mescla, tot i que no és tant clara com en els casos anteriors.

- Les peces definitives no han estat afectades en cap dels casos.

- La concentració òptima per a realitzar aquest tractament és d'un 15% d'hidroxid de sodi en pes a la mescla total. A aquesta concentració, la peça està pràcticament neta del tot, sense cap tipus d'afectació del material de construcció. No es pot prendre com a un valor completament fiable ja que cada peça està lleugerament influïda pel procés de fabricació, però referenciada a la peça de mostra tan sols conserva 0,4 grams de material suport al finalitzar el tractament, situats íntegrament al forat inferior.

8.2.4. Assajos amb peces definitives

Un cop obtingut un tractament que es considera òptim, es procedeix a aplicar-lo a models i prototips reals. Els models que s'han escollit per a realitzar els assajos són models que presenten algun o varis dels problemes descrits anteriorment pel que fa a la neteja tradicional mitjançant aigua a pressió, ja que o bé tenen molt poca consistència, o bé tenen llocs de difícil accés o es tracta de models molt petits i es necessita molta precisió i cura per a la seva neteja. S'ha procedit a aplicar el següent tractament: 25% de pes en la mescla total de polietilenglicol, 15% de pes en la mescla total d'hidròxid de sodi i el 60% restant d'aigua destil·lada. Aquesta mescla s'ha introduït en un bany d'ultrasons, i s'ha realitzat un filtratge cada trenta minuts, per eliminar el suport a mesura que aquest es va desprenent de les peces. Els resultats obtinguts es mostren a la Taula 24.

| Peça | Pes inicial [g] | Pes final [g] | Suport eliminat [g] | Hora inici [hh:mm] | Hora final [hh:mm] | Duració [hh:mm] |
|----------------|-----------------|---------------|---------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| Dents | 70,1 | 52,3 | 17,8 | 10:15 | 13:15 | 03:00 |
| 5 forats | 7,3 | 1,53 | 5,77 | 10:15 | 14:30 | 04:15 |
| Polsera petita | 37,1 | 4 | 33,1 | 10:15 | 16:15 | 06:00 |
| Aro | 129,5 | 65,7 | 63,8 | 10:15 | 16:15 | 06:00 |
| Moebius | 23,6 | 9,4 | 14,2 | 10:15 | 16:45 | 06:30 |
| Polsera gran | 111,2 | 10,1 | 101,1 | 10:15 | 17:00 | 06:45 |

Taula 24. Resum del resultats obtinguts en l'experimentació amb les peces definitives.

Font: elaboració pròpia.

Als temps obtinguts s'hauria de descomptar entre trenta i quaranta-cinc minuts associats al procés de filtratge, doncs per realitzar-lo s'han d'extreure les mescles del bany d'ultrasons i un cop estan fora s'ha de treure la peça de l'interior de la mescla per poder realitzar la filtració.

Cap de les peces ha estat afectada químicament pel tractament, i en tots els casos la durada total ha estat molt per sota de les dotze hores marcades com a límit superior.

-Peça dentadura completa:

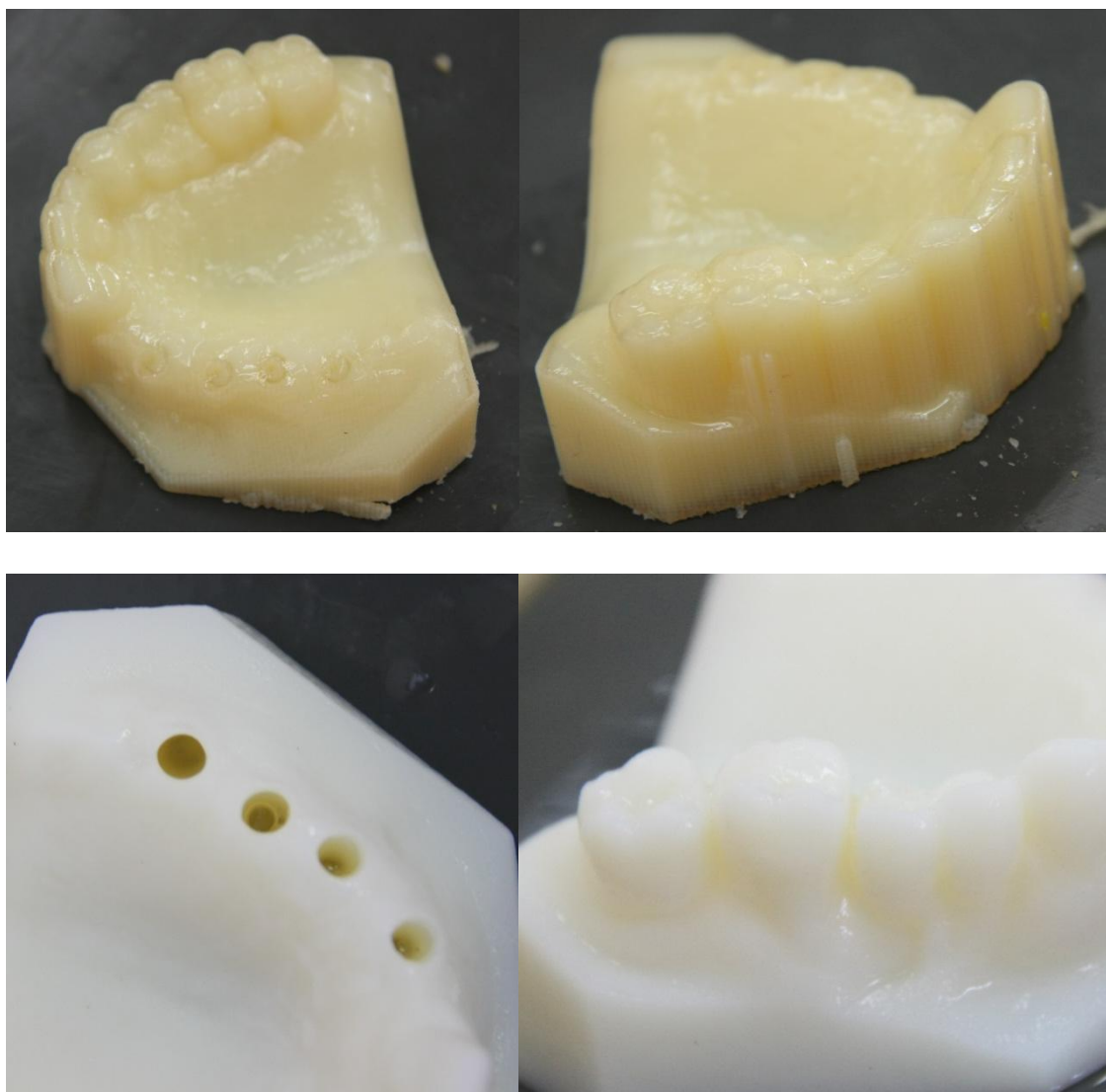


Figura 22. Dentadura completa abans (imatges superiors) i després del tractament (imatges inferiors). Font: elaboració pròpia.

Aquest tractament a permès eliminar completament el suport d'una peça dental on es necessita que estigui perfectament neta per poder-hi encaixar les peces que falten als orificis. Amb el sistema actual de neteja, després de netejar la peça amb aigua a pressió es necessita que un operari realitzi un segon procés de neteja manual a l'interior dels forats per permetre els encaixos.

- Peça dental 5 forats:

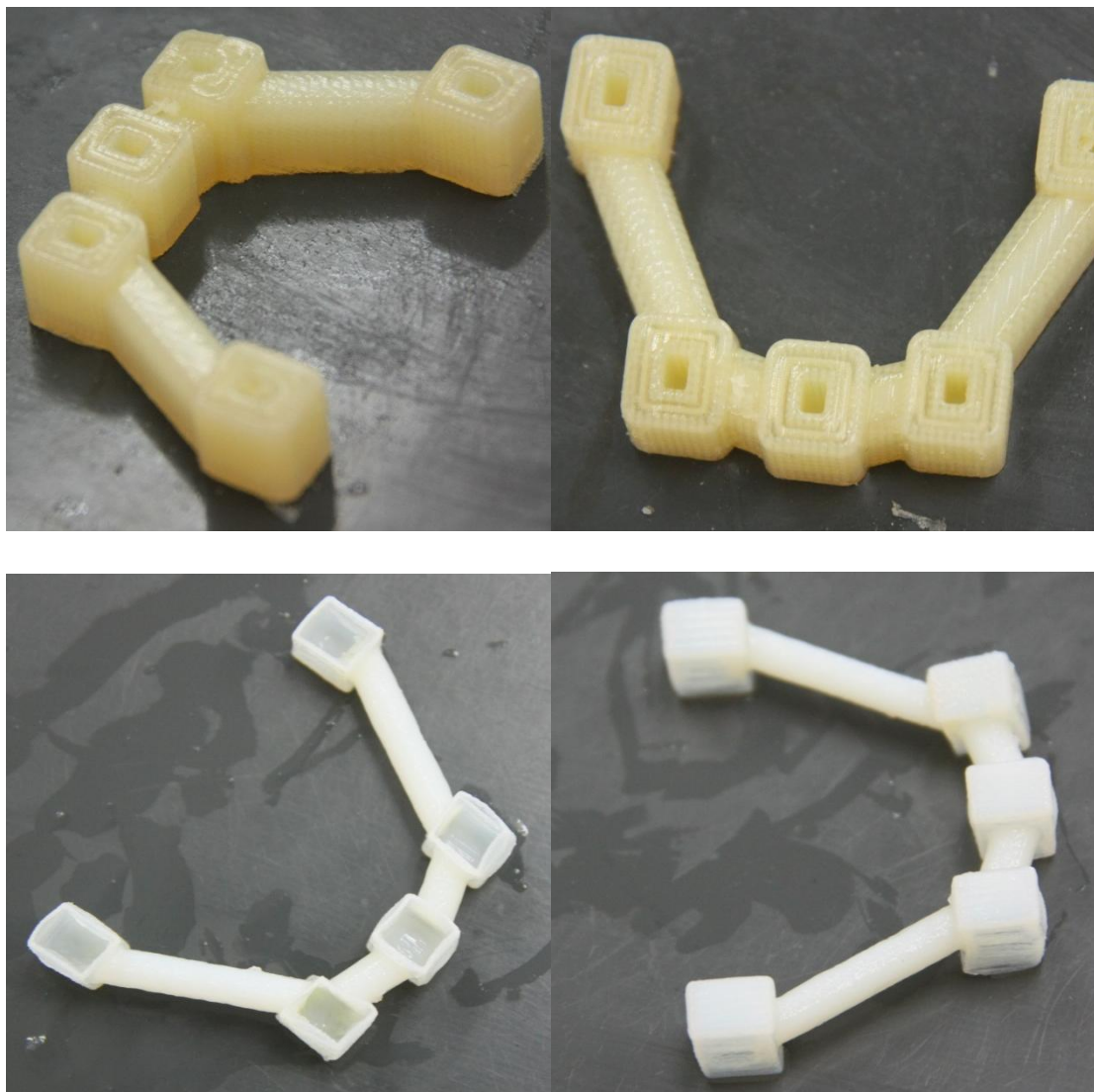


Figura 23. Peça dental amb 5 forats abans (imatges superiors) i després del tractament (imatges inferiors). Font: elaboració pròpia.

Durant la realització d'aquest tractament s'ha superat puntualment la HDT del material, quedant deformada de manera permanent degut a les parets extremadament fines de la peça. Malgrat això, el tractament ha permès netejar i eliminar completament el suport d'una peça impossible de netejar segons la metodologia tradicional.

- Polsera petita:



Figura 24. Polsera petita abans (imatges superiors) i després del tractament (imatges inferiors). Font: elaboració pròpia.

La extrema fragilitat d'aquesta peça, degut al seu fi disseny i al no ser una circumferència completa provoquen que sigui molt difícil de netejar i amb elevades possibilitats de trencar-se durant el procés. A més, al no poder-se netejar còmodament provoca que l'eliminació completa del suport sigui bastant inviable, deixant restes de suport sense netejar.

- Aro encreuat:



Figura 25. Aro encreuat abans (imatges superiors) i després del tractament (imatges inferiors). Font: elaboració pròpia.

Aquesta peça també resulta bastant difícil de netejar per la seva geometria i la quantitat de forats encreuats que conté. La peça no està completament neta ja que a causa de la seva mida no s'ha pogut submergir completament en la mescla. S'ha considerat netejada quan la part submergida ha quedat completament lliure d'estructura de suport.

- Tira de Moebius:

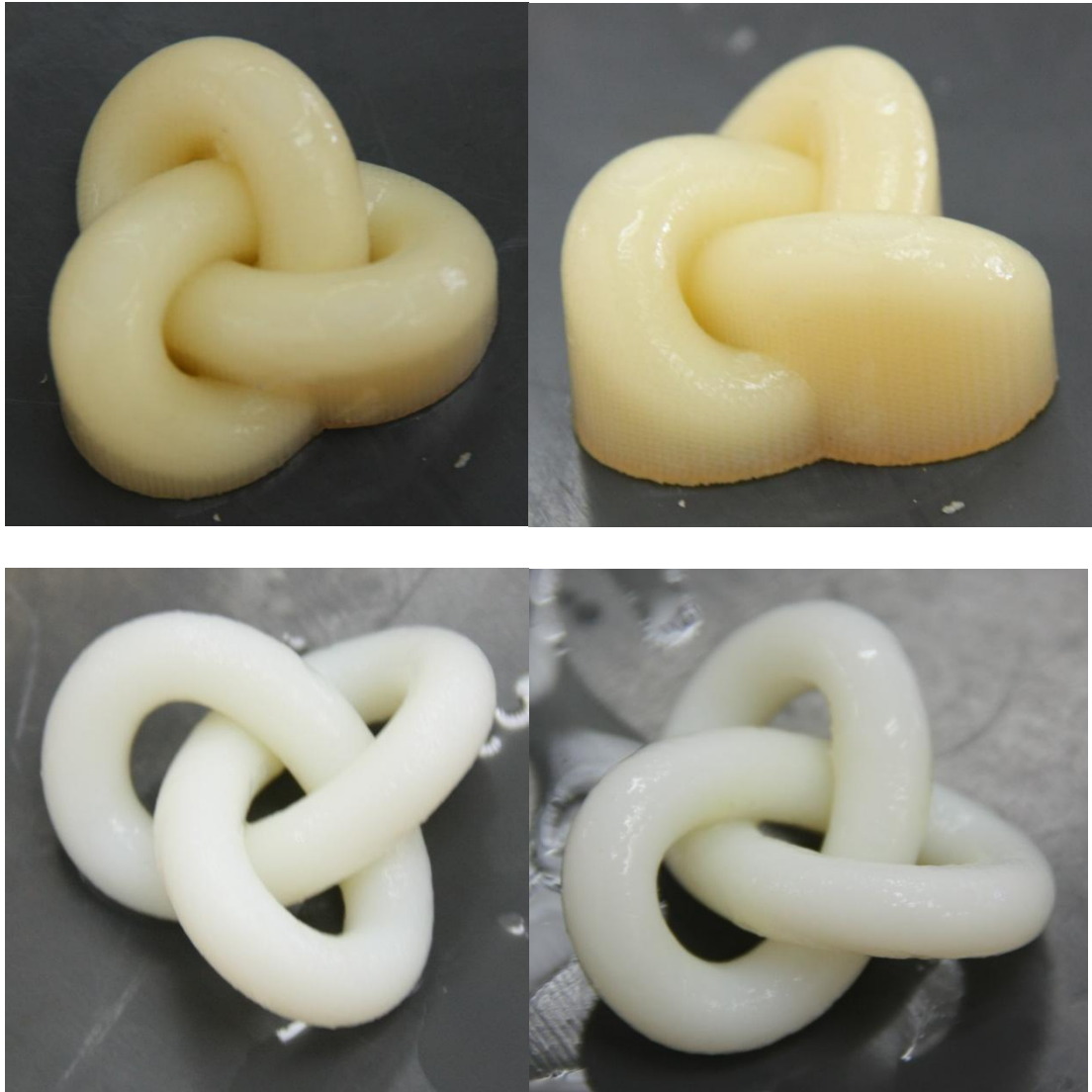


Figura 26. Tira de Moebius abans (imatges superiors) i després del tractament (imatges inferiors). Font: elaboració pròpia.

Aquesta peça presenta dificultats a l'hora de ser netejada degut a la seva geometria que s'encreua constantment, complicant l'accés a les parts interiors i a les fines capes de suport dipositades entre les tires que es superposen.

- Polsera gran:

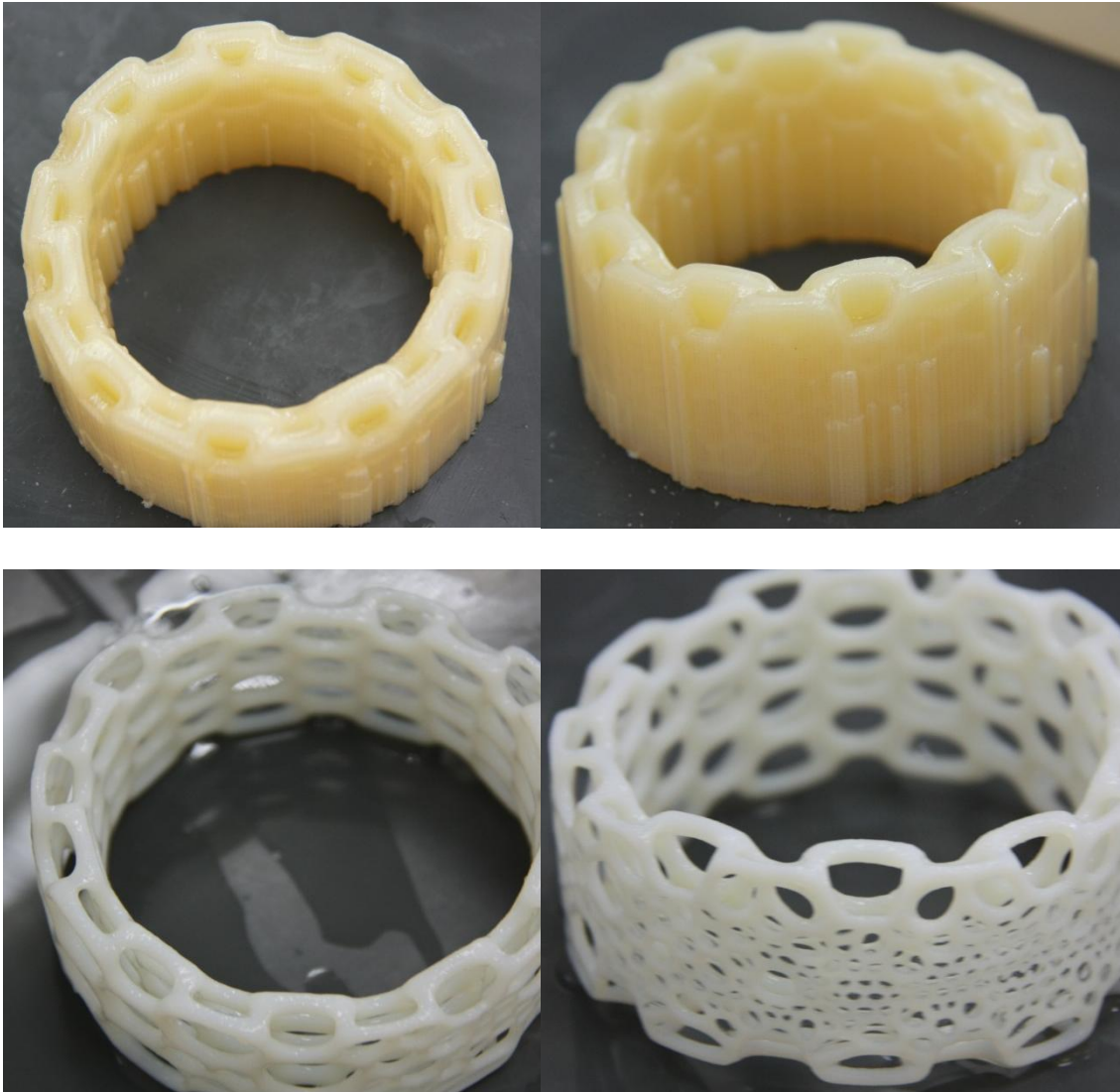


Figura 27. Polsera gran abans (imatges superiors) i després del tractament (imatges inferiors). Font: elaboració pròpia.

Aquesta peça presenta una gran dificultat a l'hora de netejar-se degut a la seva geometria que rodeja amb material de construcció una estructura interna de suport. A més té un conjunt de petits forats molt dèbils que en aplicar aigua a pressió és fàcil trencar.

8.2.5. Compatibilitat amb altres materials de la gamma *Rigid Opaque*

Un cop finalitzats els assajos amb peces definitives s'ha procedit a realitzar un estudi de compatibilitat amb diferents materials de la gamma *Rigid Opaque* de tecnologia PolyJet d'Stratasys, ja que malgrat presentar unes característiques pràcticament idèntiques al material estudiat (VeroWhitePlus RGD835) la seva estructura interna no és exactament igual. Per a realitzar aquest estudi s'han realitzat tres peces més amb els materials VeroYellow RGD836, VeroCyan RGD841 i VeroMagenta RGD851. Aquestes tres peces han estat realitzades amb la impressora Objet500 Connex3 d'Stratasys. Els resultats obtinguts es mostren a la Figura 28.



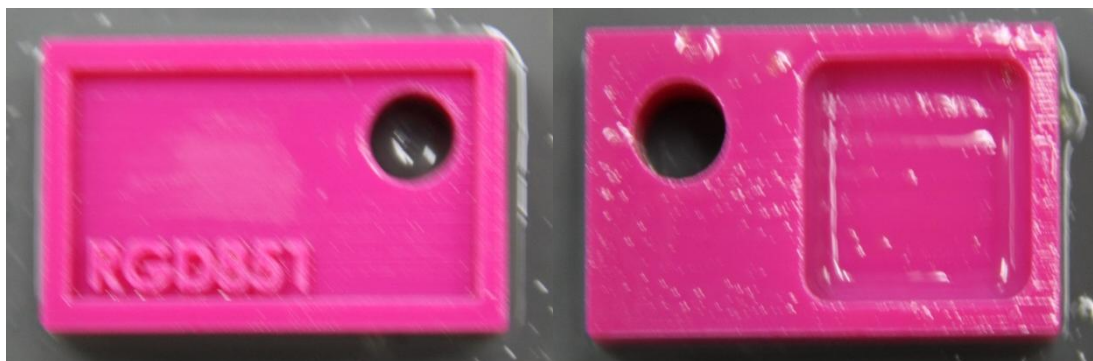


Figura 28. De dalt a baix: VeroYellow RGD836, VeroCyan RGD841, VeroMagenta RGD851. Font: elaboració pròpia.

En cap dels tres casos les peces han estat afectades pel tractament realitzat, i el desenvolupament del procés ha estat equivalent al de les peces realitzades amb el material VeroWhitePlus RGD835.

9. Planificació temporal i cost

9.1. Planificació temporal

Aquest projecte té una projecció temporal de quatre mesos, que comencen el 3 de març quan es planteja i s'inicia aquest projecte, i finalitzen el dia 4 de juliol amb l'entrega de la memòria definitiva. La distribució temporal que s'ha seguit es pot observar al diagrama de Gantt representat a la Figura 29.

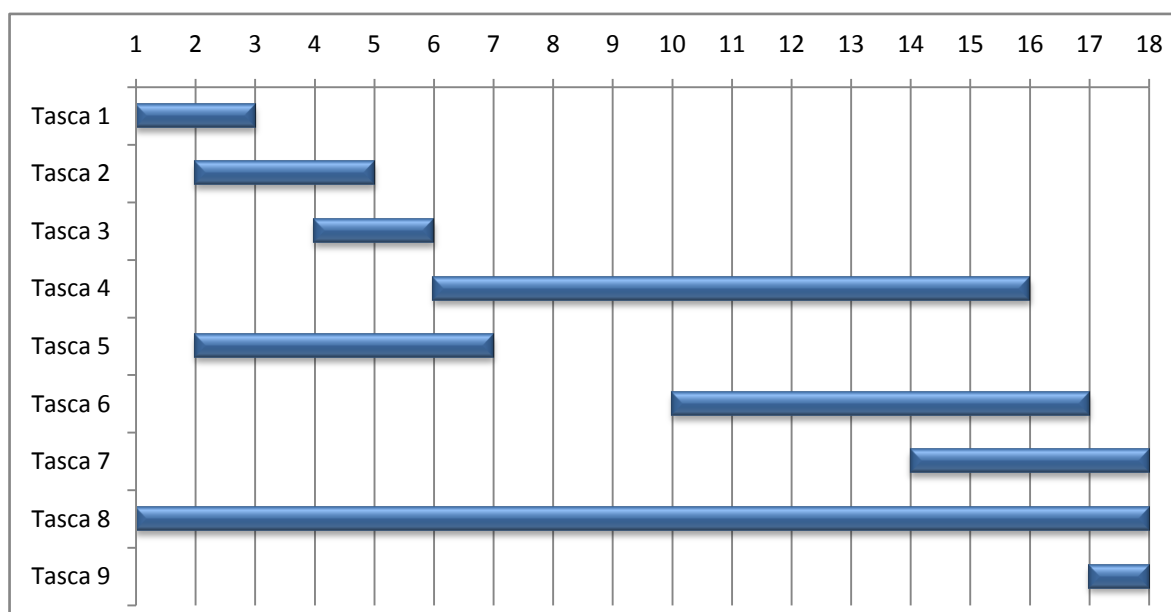


Figura 29. Planificació temporal del projecte. Font: elaboració pròpia.

- Tasca 1: Documentació sobre la fabricació additiva i la impressió 3D
- Tasca 2: Documentació sobre polímers, fotosensibilitat i atac químic a polímers
- Tasca 3: Caracterització dels materials
- Tasca 4: Procés experimental
- Tasca 5: Redacció fabricació additiva
- Tasca 6: Redacció procés experimental
- Tasca 7: Compilació i redacció memòria definitiva
- Tasca 8: Elaboració bibliografia
- Tasca 9: Entrega memòria definitiva

9.2. Cost

Per al desenvolupament d'aquest projecte els principals costos que se n'han derivat han estat els associats al material necessari per a la realització de les peces amb que s'ha experimentat. Degut a la condició d'estudiant en pràctiques dins d'una empresa que es dedica a la distribució d'impressores 3D s'ha tingut ple accés tant als materials com a les màquines en sí mateixes, sense cap tipus de restricció en quantitat ni en temps d'utilització. El cost que aquests materials han suposat a l'empresa no es poden detallar per problemes de confidencialitat, i a més tampoc es podria quantificar una amortització de la màquina ni un cost per hora de treball.

Per aquest motiu l'estudi econòmic s'ha realitzat com si la fabricació d'aquestes peces s'hagués encarregat a un servei de *bureau*, que són empreses dedicades íntegrament a la realització de prototips per a tercers. En aquest cas l'empresa escollida és Eceleni, a qui s'han encarregat la realització de pressupostos per a la realització de les peces necessàries. Els cost de l'impressió d'un determinat conjunt de peces no és directament proporcional al nombre de peces que conté, ja que malgrat la quantitat de material de construcció i de suport si que s'incrementa proporcionalment al nombre de peces, el temps d'impressió depèn de molts altres factors (disposició de les peces a la safata, desplaçament necessari en els eixos Y i Z necessaris per a completar l'impressió, etc.), i per aquest motiu el preu no mostra una evolució lineal respecte el nombre de peces.

A més a més també s'han hagut d'adquirir una sèrie de dissolvents específics no disponibles als laboratoris de l'ETSEIB, essencialment alcohols complexos d'utilització industrial: el propilenglicol i el polietilenglicol.

Els costos associats a l'adquisició de tot el necessari per a la realització del projecte es presenten a la Taula 25.

| Concepte | Unitats | Cost/Unitat [€/un.] | Cost (sense IVA) [€] |
|---------------------------------------|------------|---------------------|----------------------|
| Prototips | | | |
| - NaOH / Varis | 5 / 4 (9) | - | 250 |
| - KOH | 5 | - | 180 |
| - Alcohols | 4 | - | 160 |
| - Alcohols + NaOH (Ultrasons / sense) | 4 / 6 (10) | - | 275 |
| - Ultrasons (Alcohol + NaOH / NaOH) | 3/3 (6) | - | 220 |
| - Reducció PEG | 3 | - | 120 |
| - Peces definitives | 6 | - | 350 |
| - Assajos compatibilitat | 3 | - | 120 |
| Dissolvents | | | |
| - Polietilenglicol 1l. | 2 | 19,22 | 38,44 |
| - Propilenglicol 1kg. | 1 | 9,63 | 9,63 |
| - Sosa càustica 1kg. | 1 | 3,06 | 3,06 |
| TOTAL | | | 1726,13 |

Taula 25. Costos associats a l'adquisició del material necessari per a l'experimentació

A aquests costos se'ls hi ha de sumar l'impost sobre el valor afegit IVA que actualment suposa un sobrecàrrec d'un 21% del valor total, amb el que el cost final d'adquisició del material és de 2.088,62€.

Al preu d'adquisició del material s'ha d'afegir el cost associat al personal que ha realitzat el projecte, que en aquest cas s'ha considerat un preu per hora d'enginyer en pràctiques de 20 euros/hora i una dedicació total de 310 hores: 50 hores de recerca i recopilació d'informació, 180 hores d'estudis experimentals, 25 hores d'anàlisi dels resultats obtinguts, 40 hores de redacció de la memòria i 15 hores de revisió de la memòria i redacció dels annexos. El cost total associat al personal és de 6.200€.

S'ha desestimat l'amortització i el desgast del material emprat en el laboratori degut a que el seu cost és mínim en comparació al del projecte.

El cost final del projecte s'estima en 8.288,62€.

10. Impacte medi ambiental

Tots els materials utilitzats per les impressores 3D de la marca Stratasys són biodegradables i compleixen amb unes normatives molt restrictives en aspectes de seguretat i medi ambient. Tots els materials disposen d'una fulla amb les dades de seguretat i potencials perills, anomenades Material Safety Data Sheet. A més, totes aquestes substàncies estan registrades al REACH, Reglament (EC) 1907/2006, que és el reglament europeu relatiu al registre, l'avaluació, l'autorització i la restricció de substàncies i preparats químics per garantir un elevat nivell de protecció de la salut humana i del medi ambient, i compleixen els seus requisits.

Durant tot el procés experimental s'han seguit rigorosament les normatives pel que fa al tractament de residus generats en els laboratoris de l'ETSEIB.

Les substàncies amb que s'ha experimentat no presenten cap risc per al medi ambient, doncs tots els components amb que s'ha treballat es poden abocar directament als sistemes de desguàs sense precaucions.

El propilenglicol està considerat com a substància no perillosa segons el Reglament (CE) 1272/2008 i segons la Classificació (67/548/CEE o 199/45/CE), no és tòxic i és una substància biodegradable¹⁹.

El polietilenglicol també està considerat com a no perillosa segons el Reglament (CE) 1272/2008 i segons la Classificació (67/548/CEE o 199/45/CE), no és tòxic i és una substància biodegradable²⁰.

¹⁹ "Ficha de Datos de Seguridad Según Reglamento (CE) 1907/2006, -1545- 1,2-Propanodiol", PanreacAppliChem

²⁰ "Ficha de Datos de Seguridad Según Reglamento (CE) 1907/2006, -2438- Polietilenglicol 4000 *escamas", PanreacAppliChem

Conclusions

Amb la realització del procés experimental descrit al llarg d'aquest projecte s'ha pogut arribar a un tractament definitiu que dona resposta al problema presentat. Ha permès obtenir uns resultats positius pel que fa a la duració i a l'eliminació completa de l'estructura de suport, doncs permet eliminar-la de forma íntegra i, malgrat dependre de la geometria de la peça i del gruix de l'estructura, la duració en tots els casos és inferior al límit fixat de dotze hores.

L'únic aspecte al que no s'ha pogut donar solució durant el desenvolupament del projecte és al procés d'automatització, ja que el tractament requereix de la realització d'un filtratge de la mescla cada trenta minuts.

Pel que fa a l'aspecte mediambiental no presenta cap canvi respecte al procés tradicional.

Possibles actuacions futures

Del projecte se'n desprèn la necessitat de realitzar futurs estudis de compatibilitat amb els diferents materials que la tecnologia PolyJet ofereix, així com els possibles ajustos i/o modificacions que aquests requereixin. D'aquesta manera es podria presentar el tractament com una solució definitiva per totes les gammes de materials disponibles i no únicament restringit a la gamma *Rigid Opaque*.

L'altra possible actuació futura a realitzar és l'implementació d'aquest tractament en una màquina automatitzada. Mitjançant aquesta implementació es podria realitzar el tractament de forma completament autònoma i sense la necessitat de cap operari durant tot el procés, permetent al mateix temps establir variables que com la temperatura poden afectar de manera crítica a la peça. A més, per evitar la creació de la doble fase diferenciada en la mescla i per reduir la duració total del procés s'hauria de realitzar un sistema de filtratge i recirculació simultani, mitjançant una petita bomba i un filtre on es diposita tot el suport retirat de la peça i que permetés la seva extracció per a realitzar-li una neteja periòdica o una substitució.

Agraïments

En primer lloc m'agradaria agrair a tots els becaris i estudiants presents aquest quadrimestre als diversos laboratoris de química de l'ETSEIB, per la seva paciència i ajuda en tot el que ha estat necessari, especialment a la Mònica i a la Diana.

En segon lloc m'agradaria agrair l'ajuda del doctor Jordi Bou, per les seves aportacions en matèria de química orgànica i de polímers, així com per la realització de l'espectroscòpia infraroja a partir de la qual s'ha pogut afrontar el problema present.

Agrair també l'ajuda i col·laboració de Joan Pascual, per obrir-me una nova via d'investigació quan el projecte semblava estar en un punt mort i sense possibilitat d'avançar.

Nombrar també l'empresa Eceleni i en concret al Sr. Eloy Bautista, per dedicar-me part del seu temps a realitzar les medicions i estimacions de materials, així com tot el necessari per poder confeccionar els pressupostos de les meves peces, sabent que posteriorment no les fabricaria.

Un altre dels factors claus que han permès la materialització d'aquest projecte és el suport incondicional de l'empresa Comher, S.L., al possibilitar-me un accés complert i sense cap mena de restricció tant a les impressores 3D com a les cares resines que aquestes utilitzen.

Agrair el suport rebut i tota la feina realitzada al doctor José Luis Cortina, que ha exercit les funcions de tutor a la universitat i m'ha permès accedir a totes les instal·lacions i utensilis disponible als laboratoris de l'ETSEIB.

Finalment i de forma més destacada, agrair tot a Mercedes Musa, per creure en el projecte i animar-me a dur-lo a terme, per guiar-me i ajudar-me, i per la infinita paciència que ha mostrat en tot moment. Sense ella res d'aquest projecte hagués estat possible.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

[3] ASTM F2792 - 12a. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies.

[4] The STL Format. *Fabbers* [en línia]. Font tècnica: 3D Systems, Inc. STereoLithography Interface Specification, octubre de 1989. [Consulta: 8 març 2014]. Disponible a: <<http://www.ennex.com/~fabbers/StL.asp>>

[6] Grimm, T. 3D Printing: Speaking the Language. *Engineering* [en línia]. 2 febrer 2012. [Consulta: 4 març 2014]. Disponible a: <<http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/3918/3D-Printing-Speaking-the-Language.aspx>>

[7] Miller, E. 3D Printing, Rapid Prototyping, Additive Manufacturing? What is the Difference?. *PADT, Inc.* [en línia]. 5 novembre 2012. [Consulta: 4 març 2014]. Disponible a: <<http://www.padtinc.com/blog/the-rp-resource/3d-printing-rapid-prototyping-additive-manufacturing-what-is-the-difference>>

[8] Palermo, E. What is Selective Laser Sintering?. *LiveScience* [en línia]. 13 agost 2013. [Consulta: 12 març 2014]. Disponible a: <<http://www.livescience.com/38862-selective-laser-sintering.html>>

[9] Prototype metals are the most important RP innovation and paradigm shift in the evolution of manufacturing. *DMLS/Direct Metal Laser Sintering* [en línia]. [Consulta: 12 març 2014]. Disponible a: <<http://dmls.net/>>

[10] How Selective Heat Sintering (SHS) Works. *THRE3D* [en línia]. [Consulta: 12 març 2014]. Disponible a: <<https://thre3d.com/how-it-works/powder-bed-fusion/selective-heat-sintering-shs>>

[11] Selective Laser Melting. *TWI Ltd.* [en línia]. [Consulta: 12 març 2014]. Disponible a: <<http://www.twi-global.com/technologies/welding-surface-engineering-and-material-processing/additive-manufacturing/selective-laser-melting/>>

[12] How Electron Beam Melting (EBM) Works. *THRE3D* [en línia]. [Consulta: 12 març 2014]. Disponible a: <<https://thre3d.com/how-it-works/powder-bed-fusion/electron-beam-melting-ebm>>

[13] Crawford, M. CreatingValveTissueUsing 3-D Bioprinting. *ASME American Society of MechanicalEngineers* [en línia]. Maig 2013. [Consulta: 6 març 2014]. Disponible a: <<https://www.asme.org/engineering-topics/articles/bioengineering/creating-valve-tissue-using-3d-bioprinting>>

[14]Palermo, E. Fused Deposition Modeling: Most Common 3D Printing Method. *LiveScience* [en línia]. 19 setembre 2013. [Consulta: 4 març 2014]. Disponible a: <<http://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>>

[15]Stereolithography. *Materialise* [en línia]. [Consulta: 14 març 2014] Disponible a: <<http://manufacturing.materialise.com/stereolithography>>

[16] Laminated Object Manufacturing. *eFunda, Inc.* [en línia]. [Consulta: 14 març 2014]. Disponible a: <http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/lom.cfm>

Bibliografia complementària

De Ciurana, Q. [et al.]*Guía de Tecnologías de Rapid Manufacturing*. 2a ed. Girona: Documenta Universitaria, 2008. ISBN 974-84-935231-3-8.

Production Methods: What's the Difference Between Selective Laser Sintering, Direct Metal Laser Sintering, Laser Melting and Laser Cusing?. *Core77* [en línia]. 18 febrer 2014. [Consulta: 12 març 2014]. Disponible a: <http://www.core77.com/blog/materials/production_methods_whats_the_difference_between_selective_laser_sintering_direct_metal_laser_sintering_laser_melting_and_lasercusing_26457.asp>

Buj, I., Fenollosa, F. *Fabricació ràpida de prototips*. [Apunts i presentacions de l'assignatura]. Barcelona, 2014.

Anderson, G. The Future of 3D Printing With Terry Wohlers. *Engineering* [en línia]. 9 setembre 2013. [Consulta: 7 març 2014]. Disponible a: <<http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/6294/The-Future-of-3D-Printing-With-Terry-Wohlers.aspx>>